Ueber den Widerstand,

welchen Kugeln verschiedenen Durchmessers und specifischen Gewichts in geschlossenen Röhren finden, welche mit verschiedenen Flüssigkeiten und Lösungen gefüllt sind.

Inauguraldissertation

zur Erlangung der Doktorwürde

bei

Hochlöblicher philosophischer Fakultät

zu

Marburg,

eingereicht

von

Carl Zuschlag,

Ordentlichem Lehrer an dem Gymnasium zu Cassel.

CASSEL 1871.

Hof- und Waisenhaus-Buchdruckerei.

Ueber den Widerstand

welchen kugelförmigen Projectilen von specifischen Gewichten in gasförmigen Medien Gestalt, welche die verschiedenen Erscheinungen und Lösungen geltend sind.

Inauguraldissertation

zur Erlangung der Doktorwürde

einer

Hochlöblicher philosophischer Fakultät

der

Marburg.

vorgelegt

von

Carl Zuschlag

Gymnasiallehrer an dem Gymnasium zu Cassel.

Cassel 1871.

Ueber den Widerstand,

welchen Kugeln verschiedenen Durchmessers und specifischen Gewichts in geschlossenen Röhren finden, welche mit verschiedenen Flüssigkeiten und Lösungen gefüllt sind.

Inauguraldissertation

zur Erlangung der Doktorwürde

bei

Hochlöblicher philosophischer Fakultät

zu

Marburg,

eingereicht

von

Carl Zuschlag,

Ordentlichem Lehrer an dem Gymnasium zu Cassel.

CASSEL 1871.

Hof- und Waisenhaus-Buchdruckerei.

Ueber den Widerstand,

welchen Kugeln verschiedenen Durchmessers und specifischen Gewichts in gewichtslosem Wasser finden, welche mit verschiedenen Anfangsgeschwindigkeiten getrieben sind.

Inauguraldissertation

zur Erlangung der Doktorwürde

bei der

hochlöblicher philosophischer Fakultät

der

Marburg.

eingereicht

von

Carl Znaeck,

Gymnasial-Lehrer aus dem Erzgebirge zu Saaz.

Saaz (Böhmen). 1871.

Buchdruckerei von Hermann Mayer.

Seinem väterlichen Oheim

Herrn Oberfinanzrath a. D. G. Zuschlag

in Liebe und Dankbarkeit

gewidmet.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41554015_0057

Ueber den Widerstand, welchen Kugeln verschiedenen Durchmessers und specifischen Gewichtes in geschlossenen Röhren finden, welche mit verschiedenen Flüssigkeiten und Lösungen gefüllt sind.

Die nachstehende Experimental-Untersuchung habe ich auf Veranlassung von Herrn Professor Melde in Marburg unternommen und während der Sommerferien von 1869 eine erste Reihe von Beobachtungen im physikalischen Laboratorium zu Marburg angestellt, woselbst mir ein Zimmer ganz zur Verfügung gestellt und der erforderliche Apparat theils in vorhandenem Material gewährt, theils unter freundlichster Hülfe des Herrn Professor Melde neu geschafft wurde.

Eine neue Reihe von Beobachtungen wurde, da die Ferienzeit zur Vollendung der Experimental-Untersuchung nicht ausgereicht hatte, in den Räumen der hiesigen „Polytechnischen Schule“ gemacht, woselbst mir der Director derselben, Herr Dr. Wiecke, die zu den Experimenten nöthigen Räume freundlichst überliess.

§. 1.

Einleitung.

Es giebt wohl kaum ein Problem in der Physik, das von so vielen Mathematikern und Physikern bearbeitet worden ist, als das von dem Widerstand der Mittel. Es ist dies freilich auch äusserst begreiflich, denn die Wissenschaft wie das praktische Leben mussten beide das grösste Interesse daran haben, über diese Frage soviel als möglich ins Klare zu kommen.

Bei unzähligen Versuchen der Wissenschaft kam stets der Widerstand der Luft in Betracht, die Alles umgiebt; das Pendel, mit der Wage das wichtigste Messinstrument der ganzen Physik, schwingt nicht im leeren Raume, sondern muss stets den Widerstand der Luft überwinden und bedarf desshalb, will man seine Länge genau bestimmen, der Reduktion auf den leeren Raum. Nur äusserst künstlich konnten leere Räume hergestellt werden, in denen die Bewegung und der Fall von Körpern vor sich ging; in der Natur mussten sie stets den Widerstand verschiedener Mittel überwinden, und dadurch musste die Zeit, die sie für ihre Bewegung brauchten, wesentlich alterirt werden.

Ja, nachdem einmal die Lehre vom Licht von dem Vorhandensein des den ganzen Weltenraum durchdringenden Aethers bei allen ihren Hypothesen ausgegangen war, musste die Frage von dem Widerstand selbst dieses Mittels für die Bewegung aller Weltkörper auftauchen, von denen uns das Licht noch Kunde bringt. Und in der That sind auch darüber, namentlich seitdem Encke eine Verkürzung der Umlaufszeit des nach ihm benannten Kometen, aus dem Widerstande dieses Mittels zu erklären versuchte, Untersuchungen angestellt worden. Aber ebenso wie die Wissenschaft musste das praktische Leben das grösste Interesse an der Lösung dieser Frage haben; brauchen wir doch bloss, um dieses zu zeigen, an die Handel und Verkehr beherrschende Schifffahrt zu erinnern, für welche die Lehre von dem Widerstand des Wassers gegen in ihm bewegte Körper verschiedener Formen von der höchsten Bedeutung war. Daher ist's auch grade die Schifffahrt, welche die bedeutendsten Arbeiten auf diesem Gebiete veranlasst hat.

Selbst die Verderben bringende Kanonenkugel musste dieser Frage der Wissenschaft dienstbar werden, denn der Widerstand der Luft, die sie durchschnitt, war für dieselbe von grosser Bedeutung. So nahm also auch begreiflicher Weise die Artillerie grossen Antheil an der Lösung dieses Problems und veranlasste wichtige Abhandlungen auf diesem Gebiete, auf die, wie überhaupt, wir später zurückkommen werden.

Wenn es sich so leicht begreift, dass die Physik grade auf diesem Gebiete eine lange Reihe von Arbeiten besitzt, die mit dem grössten Fleisse, bedeutendem Scharfsinn, Erfindungs- und Beobachtungsgabe, ungemeinem Zeitaufwande und oft auch sehr grossen Kosten ausgeführt sind, so wird man eben desshalb mit um so grösserem Rechte die Frage aufwerfen, weshalb wir noch einmal auf diese Frage wieder zurückkommen, ja bei unseren, gewiss bescheidenen Kräften, gegenüber jenen Heroen der Wissenschaft, überhaupt darauf zurückzukommen wagen, da entweder die Fragen

erledigt sind oder wohl kaum eine Erledigung hoffen lassen. Aber Fragen, die ein sehr grosses Gebiet umfassen, lassen auch meist eine sehr verschiedene Behandlung zu und sind aller möglichen Modifikationen fähig.

So zeigt schon der Titel unserer Abhandlung den Zusatz: „geschlossene Röhre", in welcher die Kugeln hinabrollen, während die uns vorliegenden Arbeiten, so viel uns bekannt, stets das Medium unbegrenzt oder doch die Wände des Gefässes so weit entfernt annehmen, dass sie keinen merkbaren Einfluss mehr auf die Zeitdauer der Bewegung ausüben. Weiter sind die Medien, die in den uns bekannt gewordenen Arbeiten behandelt worden sind, fast[1]) stets Luft oder Wasser, allerdings ungleich die wichtigsten, namentlich, soweit das praktische Interesse den Ausschlag giebt; ob aber bei anderen Flüssigkeiten bloss von dem veränderten specifischen Gewichte ein Einfluss geübt wird, bedarf mindestens noch der experimentellen Bestätigung. Es wird sich im Laufe der Untersuchung herausstellen, dass das specifische Gewicht der Flüssigkeit durchaus nicht allein entscheidend ist. Doch wollen wir an dieser Stelle den weiter unten mitzutheilenden Versuchen und Resultaten derselben nicht vorgreifen, es kommt uns hier zunächst nur darauf an, die Möglichkeit und Berechtigung weiterer Experimental-Untersuchungen über diesen Gegenstand darzulegen. Um aber den Unterschied unserer Untersuchungen von den früheren klar zu erkennen, bedarf es einer (wenn auch nur kurzen) Darstellung der bis jetzt gemachten Experimental-Untersuchungen, und der aus ihnen gewonnenen Resultate. Wir wollen bei derselben hauptsächlich die verschiedenen Methoden der Versuche ins Auge fassen und darnach auch die Arbeiten gruppieren, um dann später die Methode unseres Verfahrens diesen anzureihen.

§. 2.

Geschichtliche Uebersicht der verschiedenen Methoden zur Bestimmung des Widerstandes der Medien.

Zunächst lag wohl die Methode, — die auch schon Galilaei neben der schiefen Ebene bei Aufstellung der Fallgesetze angewandt hatte, — von bedeutenderen Höhen,

[1]) In einer Arbeit von Faraday (Journal of Sc. and Arts T. III. p. 354, Ann. de Chim. et Phys. T. V. p. 300, Gehler Bd. X, p. 1819) ist auch der Widerstand verschiedener Gasarten untersucht worden; eine Experimental-Untersuchung über den Widerstand verschiedener Flüssigkeiten ist uns nicht bekannt geworden.

wie etwa Kirchthürmen, Kugeln von verschiedenem Gewicht und Volumen durch die Luft einfach herab fallen zu lassen und die Fallzeiten zu vergleichen mit denen im leeren Raum, aus der sich ergebenden Differenz das Gesetz des Widerstandes abzuleiten und die mit Zugrundelegung des neuen Gesetzes berechneten Höhen zu vergleichen mit der wirklichen Höhe, aus welcher die Körper herabgefallen waren.

Schon Riccioli und Grimaldi stellten von 1640 bis 1650 solche Versuche an, indem sie hohle und massive Kugeln von dem Thurm Degli Asinelli in Bologna aus einer Höhe von etwa 280 römischen Fuss herab fallen liessen. Andere Kugeln liessen sie im Wasser niedersinken und aufsteigen. Sehr genaue Versuche stellte in dieser Weise auch Dechales[1]), ein französischer Physiker, an, dessen Bemühungen in dieser Hinsicht mit zu den bedeutendsten gehören. Am bekanntesten sind die in dieser Weise angestellten Fallversuche von Newton[2]) geworden, der aus ihnen das Gesetz ableitete, dass der Widerstand der einzelnen Flüssigkeiten dem Quadrate der Geschwindigkeiten proportional sei. Im Jahre 1710 liess er durch Hawksbee in der Paulskirche zu London aus einer Fallhöhe von 220 engl. Fuss solche Versuche mit verschiedenen Kugeln anstellen.

Beifolgende Tabelle giebt eine Probe von dem am schlechtesten und am besten stimmenden Versuche mit der Rechnung.

Gewichte.	Durchmesser.	Fallzeiten.	berechnete Höhen.
642 Gran.	5,2 Zoll.	7 Sek. 42 Tert.	230 Fuss 9 Zoll.
515 „	5,0 „	7 „ 57 „	224 „ 5 „

Da die Fallhöhe 220 Fuss betrug, so weichen die berechneten Höhen hiervon im Maximum 10 Fuss 7 Zoll, im Minimum nur 4 Fuss 5 Zoll ab, gewiss ein günstiges Resultat. Im Jahre 1719 stellte Desaguliers[3]) eine ähnliche Reihe von Versuchen an, wobei er leichte, hohle Kugeln aus Schweinsblasen von 272 Fuss Höhe herabfallen liess.

In derselben Weise wie vorhin folgt hier eine Probe des am schlechtesten und am besten stimmenden Fallversuches.

Gewichte.	Durchmesser.	Fallzeiten.	berechnete Höhen.
99,5 Gran.	5,00 Zoll.	21,125 Sek.	282 Fuss 0 Zoll.
128 „	5,28 „	19,00 „	271 „ 11 „

[1]) Cursus mathematicus. Lyon, 3 T. fol. T. I. p. 276, cf. Gehler, Bd. X. p. 1781.

[2]) Phil. Nat. Princip. L. II. Prop. XXXI. Schol. gen. cf. Gehler, Bd. X. p. 1782.

[3]) Philos. Trans. N. 362. T. XXX und XXXI. Gehler Bd. X. p. 1783.

Das Minimum der Abweichung beträgt hierbei nur 1 Zoll, das Maximum allerdings 10 Fuss, ein Resultat, das auch gut genug mit der Rechnung stimmt. Aehnliche Versuche stellte er auch über den Widerstand des Wassers an, die ebenso befriedigend ausfielen.

Früher als Newton und der letzt Genannte hatte schon Mariotte [1]) ähnliche Versuche angestellt in der Spindel der Wendeltreppe von der Pariser Sternwarte. Das Aufschlagen der Kugeln auf einem unten liegenden Brette aus einer Höhe von 166,5 Fuss beobachtete er vermittelst des Schalles, dessen Geschwindigkeit er zu 1080 Fuss in 1 Sek. annahm. In Folge des wachsenden Widerstandes müssen nach ihm fallende Kugeln eine konstante Geschwindigkeit annehmen, in Zeiten, die sich bei denen von ungleichen Massen wie die Quadratwurzeln ihrer specifischen Gewichte, bei ungleich grossen wie die Quadrate ihrer Durchmesser verhalten. Mariotte's Genosse La Hire,[2]) der mit ihm die erwähnten Versuche anstellte, war auch der Meinung, dass der Widerstand sich verhalte wie das Quadrat der Geschwindigkeit, die wirkliche Grösse desselben aber nur durch Versuche ermittelt werden könnte.

Da wir die hauptsächlichsten Arbeiten über unseren Gegenstand nach den Methoden der Versuche zunächst gruppieren, so müssen wir der Zeit nach eine grosse Reihe von Arbeiten übergehen und wollen zunächst, doch noch mit Uebergehung mancher Leistung, der Versuche gedenken, die in den Jahren 1811 bis 1815 die schwedischen Gelehrten Lagerhielm[3], Forselles und Kallstenius zu Fahlun anstellten. Um die Körper im Wasser fallen zu lassen, bedienten sie sich eines parallelepipedischen Gefässes von 29 schwedischen Fuss Höhe und 1 Fuss 7 Zoll Seite, in welchem 15,6 Fuss unter dem Centrum der herabfallenden Körper und 26,4 Fuss abermals zwei einander gegenüberstehende Gläser eingesetzt waren, um die Ankunft der fallenden Körper an beiden Stationen genau beobachten zu können. Unten fielen sie auf ein in einen Rahmen ausgespanntes Netz, welches an Schnüren herausgezogen werden konnte. Dadurch wird die Möglichkeit gewährt, mit demselben Körper leicht, so oft man will, die Versuche zu wiederholen, was sonst seine Schwierigkeiten hat. Wir kommen bei unseren eigenen Versuchen auf diesen Umstand noch einmal zurück. Die Körper, welche als

[1]) Traité de la Percussion ou du Choc des corps. 3me ed. Paris 1679. Gehler, Bd. X. p. 1784.

[2]) Mém. de l'Acad. 1714. p. 333.

[3]) Kastners Archiv, Th. XI. p. 305. Gehler, Bd. X. p. 1838 u. flgd.

Object dienten, waren meist Kugeln, und damit sie bei dem Fallen keine Drehungen erlitten, waren Vorkehrungen getroffen, dass der Schwerpunkt etwas nach unten fiel. Ebenso wie uns hat sie auch die Frage beschäftigt, wie die Kugeln am besten los zu zu lassen seien, um genau den Moment des Anfangs des Falls zu beobachten. Zuerst befestigten sie oben an der Kugel, dem etwas nach unten gelegten Schwerpunkt entgegengesetzt, ein Oehr von Blech mit Siegellack, zogen einen Faden durch und schnitten diesen dann durch. Später stellte sich aber heraus, dass die Zeitmessung grade so genau war, wenn sie die Kugel einfach mit den Fingern fassten und dann losliessen, welchem gewiss einfacheren Verfahren denn auch der Vorzug gegeben wurde. Besondere Vorkehrungen, um zu bewirken, dass die Falllinie des Körpers genau mit der Axe des Gefässes zusammenfalle, was für eine genaue Beobachtung nothwendig war, erwiesen sich als unpraktisch. Auch musste der Körper ganz nahe in der Axe des Gefässes gefallen sein, wenn er durch die erwähnten kleinen, mit Glas versehenen Oeffnungen, an denen sich gegenüber stets zwei Beobachter befanden, gesehen worden war. Die Resultate der Beobachtungen waren folgende:

Die Bewegung der Kugel ist eine gleichmässige, sie durchläuft die Räume 15,8 Fuss und 26,4 Fuss mit gleichmässiger, nicht zu- noch abnehmender Geschwindigkeit. Ausserdem gelangten die Beobachter zu einem Resultate, was grade mit einen Theil unserer Arbeit veranlasst hat, dass nämlich ein Kanal, dessen Durchmesser 4mal so gross ist, als der des in ihm bewegten Körpers, einen bedeutenden Einfluss auf den Widerstand habe, welcher verschwindet, wenn der Durchmesser des Kanals 8mal so gross wird. Das Newtonsche Gesetz, dass der Widerstand dem Quadrate der Geschwindigkeit proportional sei, fanden sie durch ihre Versuche bestätigt.

Sehr eingehend mit dieser Frage hat sich auch in derselben Weise Benzenberg[1]) beschäftigt bei seinen Versuchen, die zugleich einen direkten Beweis liefern sollten für die Umdrehung der Erde. Er stellte seine äusserst zahlreichen und ungemein genauen Versuche im Jahr 1802 auf dem Michaelisthurm zu Hamburg und 1804 in einem Schachte der Schlebuscher Gewerkschaft in der Grafschaft Mark an. Auch er beobachtete, wie schon Mariotte und Andere, das Aufschlagen der Kugel vermittelst der Ankunft des Schalles, dessen Geschwindigkeit er zu 1038 Pariser Fuss annahm,

[1]) Versuche über das Gesetz des Falls, über den Widerstand der Luft und über die Drehung der Erde. Dortm. 1804.

und mass dieses Zeitintervall vermittelst einer Tertienuhr. Auch der konstante Sinnesfehler wurde nicht vernachlässigt, sondern zu 3,7 Tertien angenommen. Benzenberg gewann aus diesen Versuchen das Resultat, dass bis zu einer Fallhöhe von 144 Fuss oder bis zu einer Geschwindigkeit von 91 Fuss in 1 Secunde das Newton'sche Gesetz, dass der Widerstand dem Quadrat der Geschwindigkeiten proportional sei, mit der Erfahrung gut übereinstimme, dass aber schon bei 100 Fuss Fallgeschwindigkeit es bedeutend von der Erfahrung abweicht und bei einer Höhe von 321 Fuss um die Hälfte zu geringe Werthe giebt.

Eine andere Methode, den Widerstand der Mittel zu untersuchen, hat die Construction besonderer Apparate veranlasst, vermittelst deren Körper von verschiedener Form mit gleichmässiger Kraft in dem Wasser oder der Luft herumgeführt wurden. Im Allgemeinen waren dieselben folgender Massen construiert: In einem Gefäss, welches mit Wasser gefüllt werden konnte, befand sich eine cylinderförmige Säule, die vermittelst einer um sie gewundenen Schnur, die durch ein Gewicht abgewickelt wurde, rasch umgedreht werden konnte. An der Säule war rechtwinklig ein Arm befestigt, von dem wieder in rechtem Winkel ein Arm hinabging, welcher den betreffenden Körper trug, der durch die Umdrehung der Säule durch das Wasser herumgeführt werden sollte. Sobald die Bewegung durch den vermehrten Widerstand gleichmässig geworden war, wurde die Zahl der Schwingungen eines halbe Secunden z. B. schlagenden Pendels gezählt, welche bei einer bestimmten Anzahl von Umdrehungen durch einen ganzen Kreis und bei verschiedenen Gewichten Statt hatten. Die auf diese Weise erhaltenen Grössen wurden durch das Abziehen desjenigen Gewichtes corrigiert, welches den Apparat für sich allein in gleich schnelle Bewegung zu setzen vermochte. In dieser Weise hatte z. B. der französische Physiker De Borda[1]) einen Apparat construiert. Er fand innerhalb der Grenzen der beobachteten Geschwindigkeiten, die allerdings nicht sehr gross waren, das Newton'sche Gesetz über den Widerstand bestätigt. Auch glaubte er, durch seine Beobachtungen gefunden zu haben, dass sich der Widerstand gegen die Kugel merkwürdiger Weise grösser zeige, wenn sie dicht unter der Oberfläche des Wassers bewegt werde, als in der Mitte desselben. Eine ähnliche Maschine hatte auch Vince construiert, sie trug nur statt der Kugeln windmühlenartig Flügel

[1]) Mem. de l'Academie. 1763, 1767, 1770.

aus Blech, die in die Flüssigkeit eingesenkt und ausserhalb derselben bewegt werden konnten und zwar im Ganzen in der oben angegebenen Weise[1]). Auch seine Versuche ergeben, dass der Widerstand der Grösse der Oberfläche und dem Quadrate der Geschwindigkeit proportional sei; doch haben uns schon die früher erwähnten Versuche belehrt, dass diese Gesetze nur für verhältnissmässig geringe Geschwindigkeiten und nicht allzu verschiedene Flächen genau richtig sind.

Der englische Physiker Robins, der auch sehr viel Mühe auf die Lösung unseres Problems verwandte und namentlich den Widerstand der Luft gegen Geschützkugeln vermittelst des ballistischen Pendels zu bestimmen suchte, hatte auch, um seine Gesetze noch fester zu begründen, eine ähnliche Maschine, wie die obige, construiert, die er Wirbelmaschine [whirlingmachine][2]) nannte. Dieselbe beruhte im Wesentlichen auf denselben Principien und lieferte auch dieselben Resultate. Mit einer solchen Maschine, die nur noch eleganter und genauer gearbeitet war, experimentierte später Hutton,[3]) der auch auf die Lösung unseres Problems einen ganz eminenten Fleiss verwandt hat und auf die verschiedenste Weise das Ziel zu erreichen suchte. Seine Resultate sind wohl die besten, die mit dieser Art Maschine erlangt sind. Er fand auch mit dieser Maschine, was Versuche anderer Art uns schon gelehrt haben, dass zwar bei geringeren Geschwindigkeiten der Widerstand dem Quadrate derselben nahe genau proportional sei, bei grösseren aber auf eine höhere, mit der Geschwindigkeit zunehmende Potenz wachse. Mit Wasser hat Hutton keine Versuche angestellt, indem er annimmt, dass für dasselbe die nämlichen Formeln gelten, wenn man nur den Unterschied der Dichtigkeit beider Flüssigkeiten berücksichtigt. George Rennie [4]) brachte bei seinen Versuchen an dem Apparate nur die Veränderungen an, dass die Körper auch in Wasser gesenkt werden konnten.

Die Maschine Faraday's[5]), bestimmt nicht bloss den Widerstand der Luft, sondern auch verschiedener anderer Gasarten zu prüfen, war im Allgemeinen auf dasselbe

---

[1]) Philos. Trans. 1795. T. LXXXV. p. 24. Gehler, Bd. II. p. 401. Gehler, IV. p. 34. Gehler, X. p. 1788.

[2]) G. Bd. X. p. 1794 u. flgd.

[3]) Tracts. T. III. p. 159.

[4]) Philos. Trans. 1831. T. II. p. 423. G. X. p. 1836 u. flgd.

[5]) Journ. of. Sc. and Arts. T. III. p. 354. Ann. de Chim. et Phys. T. V. p. 300. G. X. p. 1819.

Princip, wie die früher erwähnten gegründet. Eine Welle mit Flügeln wurde durch eine Feder gleich stark in Bewegung gesetzt, wobei dann die Bewegung um so viel kürzere Zeit dauerte, je grösser der Widerstand des im Gefässe eingeschlossenen Gases war. Die Resultate dieser Arbeit ergaben, dass der Widerstand der einzelnen Gase, — es waren Kohlensäure, Luft, Steinkohlengas und Wasserstoffgas zur Verwendung gekommen — der Dichtigkeit derselben proportional war. (Unseres Wissens ist diese Arbeit von Faraday die einzige, in welcher neben Luft und Wasser auch noch andere Medien in das Bereich der Untersuchung gezogen sind. Eine Arbeit, in welcher neben Wasser auch noch der Widerstand anderer Flüssigkeiten untersucht worden ist, ist uns nicht bekannt; man nahm eben an, dass derselbe der Dichtigkeit der Mittel proportional sei.)

Auf die Methode vermittelst der Schwingungen des Pendels den Widerstand zu bestimmen, musste schon das Bedürfniss der Reduction des Pendels auf den leeren Raum führen. Diese war nöthig, um die absolute Länge des Secundenpendels mit vollständiger Genauigkeit zu bestimmen.

Schon Newton [1]), dessen Fallversuche oben erwähnt wurden, suchte den Widerstand der Luft auch auf diese Weise zu bestimmen. Er liess Kugeln von verschiedener Grösse und verschiedenem Gewichte als Pendel schwingen und fand, dass vorzugsweise bei sehr kleinen Schwingungen sein Satz, den die Fallgesetze gut bestätigt hatten, dass der Widerstand dem Quadrat der Geschwindigkeit proportional sei, — mit der Erfahrung nicht übereinstimmte. Neben vielen anderen ist namentlich eine Arbeit von Derham [2]) über die Schwingungen des Pendels im leeren Raum hervorzuheben. In neuerer Zeit haben sich namentlich Poisson, Bessel, Baily, [3]) Challis [4]) und Andere mit der Lösung dieses Problems beschäftigt, das eine Erörterung des Widerstandes der Luft zur nothwendigen Voraussetzung machte.

Baily liess, wie dies auch schon Bessel gethan hatte, Kugeln von Blei, Messing, Elfenbein, also von sehr verschiedenem, specifischem Gewichte bei gleichem Durchmesser und von verschiedenem Durchmesser in der Luft schwingen, dann in einem Vacuum, welches dem absoluten sehr nahe kam.

---

[1]) Principia Lib. II. Prop. XXXI. Schol. gen. G. Bd. X. p. 1782 und 1783.

[2]) Phil. Trans. 1704. T. XXIV.

[3]) Phil. Trans. 1832. p. 399.

[4]) London and Edinb. Phil. Magaz. N. I. p. 40. und N. XV. p. 185.

Auch die Artillerie, welche ja das grösste Interesse daran haben musste, den Widerstand der Luft gegen die Geschützkugeln zu ermitteln, schuf neue Methoden. Schon zu den frühsten Versuchen, die zur Auffindung des Gesetzes über den Widerstand gemacht wurden, gehören die, welche von der Academie del Cimento[1]) mit Kugeln angestellt worden sind, die aus einer Muskete geschossen wurden. Es ergab sich dabei, dass die aus grösseren Höhen geschossenen Kugeln mit geringerer Kraft aufschlugen als die unmittelbar aus dem Laufe fahrenden. Nachdem die Artillerie eine bedeutendere Ausbildung erlangt hatte, wurden die Versuche meist so angestellt, dass man die Kugel gegen das ballistische Pendel schlagen liess und aus der Grösse des Ausschlags die Berechnung vornahm; oder man schoss aus dem lothrecht gestellten Geschütze die Kugel lothrecht in die Höhe, beobachtete die erreichte Höhe und die Zeit ihres Ausbleibens. Im vorigen Jahrhundert sind solche Versuche sehr zahlreich angestellt worden; dass nach den so ungemein bedeutenden Veränderungen, welche die Artillerie in dem letzten Jahrzehnt erfahren hat, Versuche der letzterwähnten Methode, Kugeln lothrecht in die Höhe zu schiessen, gemacht und veröffentlicht worden sind, ist uns nicht bekannt geworden, obwohl die Methode, falls es möglich wäre, die Kugel lothrecht in die Höhe zu schiessen, eine sehr geeignete wäre, den Widerstand der Luft zu finden. Grade die neuen, gezogenen Geschütze werden diese Möglichkeit aber wohl viel eher gewähren, als die früheren, bei denen die Kugel schon im Lauf hin und her schlug. Bedeutendere Arbeiten auf diesem Gebiete sind von den schon mehrfach erwähnten englischen Gelehrten Robins und Hutton, von Dan. Bernoulli[2]), s'Gravesande[3]), D'Arcy[4]), Lambert[5]) gemacht worden.

Das grösste Interesse an der Bestimmung des Widerstandes, den in Wasser bewegte Körper finden, musste natürlich die Schifffahrt haben, und so sehen wir auch, dass in Frankreich, Schweden, England etc. von Akademien und Schiffsbaugesellschaften die grossartigsten und kostspieligsten Versuche angestellt werden, das Problem zu lösen. Die Akademie zu Paris ernannte zu diesem Zwecke aus ihrer Mitte eine Commission, die aus Condorcet, D'Alembert, Bossut, Du Buat und Anderen bestand und kurz in

[1]) Musschenbroek: Tentamina experimentorum naturalium. P. II. p. 117.

[2]) Comm. Acad. Petrop. T. II. p. 330, T. IV. p. 136.

[3]) Physices elementa math. T. I. §. 1908 ff.

[4]) Essay d'une theorie d'Artillerie. Dresd. 1766.

[5]) Anmerkungen über die Gewalt des Schiesspulvers und den Widerstand der Luft. Dresd. 1765.

folgender Weise ihre Versuche anstellte: In einem sehr weiten, mit Wasser gefüllten Bassin wurden Boote vermittelst eines Seiles 2 Fuss tief unter dem Wasser fortgezogen. Die Boote, deren Zahl nicht geringer als 15 war, waren 2 Fuss weit, 2 Fuss tief, 4 Fuss lang und hatten verschiedene Formen. Eins derselben war ein Parallelepipedon, welches also dem Wasser eine grade Fläche in senkrechter Richtung entgegen stellte, die anderen hatten keilförmige Vordertheile, deren Winkel von 12° zu 12°, von 12° bis 180° zunahmen, so dass also die Richtung der Fläche gegen die zu überwindende Flüssigkeit von 6° zu 6° verschieden war. Das Seil, welches diese Boote zog, war über eine Rolle geschlungen und trug an seinem Ende ein Gewicht, welches gewechselt werden konnte. Die Geschwindigkeit des Bootes wurde aus den schon wiederholt angeführten Gründen nach kurzer Zeit eine gleichmässige. War dieser Zeitpunkt eingetreten, so wurde genau die Zeit beobachtet, in welcher das Boot eine bestimmte Strecke — hier betrug sie 96 Fuss — mit gleichmässiger Geschwindigkeit zurücklegte. Das hierzu erforderliche Gewicht gab nach Abzug des Gewichtstheils für Ueberwindung der Adhäsion und der Aufstauung des Wassers am Vordertheile den erlittenen Widerstand. Die Versuche ergaben, dass der theoretisch angenommene Satz, nach welchem der Widerstand dem Quadrat des Sinus des Einfallswinkels proportional sein soll, durchaus nicht mit der Erfahrung übereinstimmte; die Differenzen waren so bedeutend, dass sie unmöglich die Folgen von Beobachtungsfehlern sein konnten. Die Akademiker leiteten daher aus diesen Versuchen eine empirische Formel ab.

Ganz diesen ähnliche Versuche stellten die schon erwähnten schwedischen Gelehrten Lagerhielm, Forselles und Kallstenius in den Jahren 1811 bis 1815 mit Unterbrechungen auf einem Teiche zu Fahlun unter der Leitung Nordmark's an. Ihre Resultate stimmten ziemlich genau mit den durch die französischen Gelehrten gefundenen überein.

Von den englischen Arbeiten auf diesem Gebiet sind vor Allem die von Colonel Mark Beaufoy[1]) zu erwähnen, der, man kann sagen, sein ganzes Leben, schon von seinem fünfzehnten Jahre an, mit seltener Energie der Lösung dieses Problems widmete. Einige seiner Arbeiten beziehen sich auf den Widerstand der Luft gegen verschieden gestaltete und in ungleichen Neigungen der Luft entgegen bewegte Flächen, um die geeignetste Gestalt der Windmühlenflügel und der Segel zu finden. Bei weitem aber den grössten Theil seiner Bemühungen richtete er auf die Erforschung des Wider-

[1]) cf. G. Bd. X. p. 1842. ff.

standes des Wassers gegen verschieden gestaltete und in verschiedenen Neigungen gegen dasselbe bewegte Körper. Die „Gesellschaft für Verbesserung des Schiffsbaues“ in England, die mit auf seinen Antrieb 1791 gestiftet wurde, liess hauptsächlich durch ihn, der sich bereits durch eine Untersuchung über die Bewegung von Pendel im Wasser bekannt gemacht hatte, eine Menge von Versuchen in einem sehr geeigneten Bassin des Grönland-Docks unweit London anstellen[1]). Der Nutzen derselben bezieht sich wesentlich auf die Schiffsbaukunst, die Methode unterscheidet sich nicht wesentlich von der schon von uns erwähnten, deren sich die französischen Akademiker bedienten.

Dann hat Beaufoy auch einzelne Abhandlungen[2]) bekannt gemacht, in denen der Widerstand in Pfunden angegeben ist, welchen eine Fläche von 1 Quadratfuss bei 6 Fuss Geschwindigkeit in 1 Sek. erleidet, wenn sie unter Winkeln von 90° bis 10° Neigung gegen die Richtung ihrer Bahn bewegt wird. Er findet denselben einmal = 42,855 Pfund, das andere Mal = 40,382 Pfund, welches letztere Resultat wohl den Vorzug verdient, weil es unmittelbar durch Messung des Widerstandes gegen eine Fläche gefunden, die bloss 1 Quadratfuss gross war, während ersteres Resultat erst durch grössere Flächen erhalten wurde, die dann reduziert wurden.

Eine Verbesserung in dieser Methode der Bestimmung des Widerstandes brachte noch Jos. Walker[3]) auf folgende Weise an. Um die Fehlerquelle zu beseitigen, die durch die Reibung des Seils im Wasser hervorgerufen wurde, mass er die zur Bewegung der Boote erforderliche Kraft vermittelst einer Federwage (eines Dynamometers), an welche das Ende des Zugseils am Boote befestigt war, unmittelbar. Das andere Ende des Seils, an welchem sich bei den früheren Versuchen das Gewicht befand, wurde vermittelst einer Winde gezogen. Zur Erreichung einer gleichmässigen Geschwindigkeit diente ein Pendel, welches die Arbeiter genau im Auge hatten und nach ihm die Zahl der Umdrehungen der Winde abmassen. Je nachdem die Zahl der Umdrehungen und damit die Geschwindigkeit grösser oder geringer werden sollte, wurde das Pendel verkürzt oder verlängert. Das wesentlichste Resultat dieser Versuche war, dass sich bei kleineren Geschwindigkeiten der Widerstand dem Quadrate der Geschwindigkeit proportional zeigte, bei grösseren darüber hinaus ging. Die Ursache

---

[1]) Nautical and hydraulic experiments with numerous scientific miscellanies. By Colonel Mark Beaufoy. London 1834.

[2]) Annals of Philos. New Ser. T. III. p. 276. cf. G. Bd. X. p. 1833 ff.

[3]) Philos. Trans. 1828. P. I. p. 15. Edinburgh Journ. of Science. N. XX. p. 355. G. Bd. X. p. 1835.

hiervon ist wohl bei grösseren Geschwindigkeiten das Aufstauen des Wassers vor dem Körper und das Zurückbleiben desselben hinter ihm, was bei geringeren Geschwindigkeiten sich nicht bemerkbar macht.

§. 3.

Die neuen Momente der eigenen Experimental-Untersuchung.

Wir gehen jetzt zu den Versuchen über, die wir selbst angestellt haben. Wir haben im Vorhergehenden gesehen, dass ausser Wasser keine andere Flüssigkeit in Beziehung auf ihren Widerstand untersucht worden ist, ebenso, dass das Medium immer so genommen wurde, dass es als unbegrenzt gedacht werden konnte in Beziehung auf den Körper, der in ihm bewegt wurde. Uebten bereits die Wände, welche irgend das Wasser einschlossen, einen merklichen Einfluss auf den Widerstand, so suchte man denselben zu beseitigen. Wir haben einmal viele verschiedene Flüssigkeiten von sehr verschiedenem, specifischem Gewichte, und verschiedene Flüssigkeiten von genau ein und demselben, specifischen Gewichte, aber anderen Stoffes untersucht, da es uns von vornherein sehr unwahrscheinlich erschien, dass der Widerstand bloss abhängen sollte von dem specifischen Gewichte, und nicht auch von der übrigen Natur der Flüssigkeit. Anderen Theils war der Einfluss zu ermitteln, den eine geschlossene Röhre, in welcher sich die betreffende Flüssigkeit befindet, auf die Kugel z. B., die sich in ihr bewegt, ausübt. Es wird freilich dadurch die Erscheinung eine verwickeltere, indem nun nicht bloss der Widerstand in Betracht kommt, den die Kugel in der Flüssigkeit findet, sondern auch die Adhäsion zwischen den Wänden und der Flüssigkeit, ebenso wie die zwischen der Flüssigkeit und dem fallenden Körper. Ja bei sehr engen Röhren, bei denen der Zwischenraum zwischen Kugel und Glaswand ein geringer ist, treten sicher sogar Capillarerscheinungen auf. Es soll auch unsere Methode zu den schon erwähnten nicht eine neue hinzufügen, die etwa einfacher dieselben Ziele wie jene erstrebte. Wir glauben vielmehr, dass nach den Seiten hin, welche die oben erwähnten experimentellen Untersuchungen im Auge hatten, die Lehre von dem Widerstand der Luft fast als abgeschlossen betrachtet werden kann. Das Newton'sche Gesetz mit den schon vielfach erwähnten Modificationen für grössere Geschwindigkeiten hat sich schliesslich bestätigt. Wir wollen einmal untersuchen, ob sich nach den schon

erwähnten, neuen Seiten hin etwa neue Resultate irgend welcher Art ergeben. Doch müssen wir, ehe wir in eine weitere Kritik der Versuche eingehen, diese erst selbst, wie die Methode angeben, deren wir uns bedient haben.

§. 4.

Beschreibung des Apparates und der Methode der Beobachtung.

Die genaue Beschreibung der Glasröhre, Kugeln, Flüssigkeiten, welche bei der jetzt auseinander zu setzenden Methode der Versuche erwähnt werden, folgt weiter unten, um hier die Uebersicht nicht zu stören. Der einfache Apparat, welcher jetzt beschrieben werden soll, dient zunächst nur dazu, die Glasröhre, nachdem sie mit der Flüssigkeit gefüllt ist, zuerst in eine genau wagerechte Lage und dann in Neigungen von 10^0 zu 10^0 bis zu 90^0 zu bringen. Die Kugel rollt also dann auf einer schiefen Ebene von dem betreffenden Winkel durch die Flüssigkeit auf der einen Glaswand hinab. Zu dem Zwecke wurde die Glasröhre an ein Gestell befestigt, das an einer Leiste zwei rechtwinklig zu ihr stehende Arme trug. Diese waren nahe ihrem Ende durchbohrt, und durch diese Oeffnungen waren Kupferdrähte gezogen, mit denen die Glasröhre fest an die Arme angezogen werden konnte, doch so, dass dieselbe eine Drehung um ihre Längsaxe zuliess, um mit den Wänden, auf denen die Kugeln hinab liefen, wechseln und so eine Fehlerkorrektion eintreten lassen zu können. Dieses Gestell war auf eine von 5^0 zu 5^0 genau getheilte, starke messingene Kreisscheibe in der Weise befestigt, dass es sich — natürlich mit der an ihm befestigten, gefüllten Glasröhre — um einen senkrecht zu der Scheibe stehenden, in der Mitte derselben befindlichen Zapfen leicht drehen liess. Aus der Mitte des Zapfens ging eine Schraube durch die Mitte der Oeffnung, die sich in dem Zapfen koncentrisch um den Mittelpunkt der Kreisscheibe befand. Durch eine Schraubenmutter mit Griffen, welche auf dieser Schraube lief, konnte das Gestell mit der Glasröhre in jeder Neigung fest eingestellt werden.

Einen Gegenstand längeren Nachsinnens und vieler Vorversuche bildete die Frage, wie soll die Kugel, welche in der Röhre durch die Flüssigkeit hinabrollen soll, losgelassen werden, damit man genau den Moment ihres Abganges bestimmen kann. Die Röhre sollte bei unseren Versuchen oben und unten geschlossen sein, liessen wir sie an dem oberen Ende offen, um dann die Kugel etwa einfach mit der Hand loszulassen,

so war die Erscheinung schon eine andere, als wenn die Kugel in der von Anfang an festgeschlossenen Röhre lief. Schon desswegen war also diese Methode zu verwerfen. Ausserdem musste bei dieser Methode die Kugel bei jeder veränderten Neigung der Röhre herausgenommen werden, ein Verlust von Flüssigkeit, mochte diese Operation noch so sorgfältig ausgeführt werden, war dabei unvermeidlich, es musste also die Röhre von Neuem gefüllt werden, wodurch die Flüssigkeit in derselben möglicher Weise für dieselbe Versuchsreihe eine kleine Aenderung erleiden konnte. Ausserdem war diese Operation ziemlich weitläufig und zeitraubend, zumal wenn viele tausende solcher Versuche angestellt wurden, wie es von uns geschehen ist. Dann wurde folgende Vorrichtung versucht: In die Glasröhre wurde die Hälfte einer Messinghülse gelegt, welche durch einen kleinen, rechtwinklig auf ihr stehenden Vorsprung die Kugel zurückhielt, so lange sie auf der unteren Seite der Wand sich befand; wurde die Glasröhre um 180° gedreht, so dass diese untere Wand oben hinkam, so fiel die Kugel heraus und lief hinab. Aber auch diese Einrichtung erwies sich nicht als praktisch, da bei grösseren Neigungen die Kugel leicht schon früher herausfiel, wie auch durch den Vorsprung die Grösse der Kugel beschränkt wurde; denn Kugeln, die nur wenig Spielraum in der Röhre hatten, konnten nicht genommen werden.

So kamen wir denn schliesslich auf die einfachste Weise, nämlich die, die Kugel dadurch in Bewegung zu setzen, dass wir die Röhre schnell aus der wagerechten Lage in die von einer bestimmten Neigung brachten. Dies Verfahren erscheint für den ersten Anblick so gewagt, so wenig zuverlässig, dass wir zunächst durch eine längere Versuchsreihe dasselbe prüften. Es wurde eine Reihe von Versuchen mit der oben erwähnten Messinghülse gemacht, indem eine Bleikugel in Wasser auf diese Weise in Bewegung gesetzt wurde; dann wurde mit derselben Röhre und Kugel und demselben Wasser das einfache Verfahren ohne jede Vorrichtung angewendet, und es ergab sich, dass die Resultate des letzteren gerade so genau waren, wie die des ersteren. Die beiden Versuchsreihen wurden mehrfach wiederholt, um die Sicherheit des Verfahrens so viel als möglich festzustellen. Aus allen ergab sich die Brauchbarkeit desselben. Die Anwendung dieses Verfahrens vereinfacht wesentlich unsere Methode, wie sich gleich herausstellen wird.

Der Hergang bei jedem Versuche war nämlich folgender: Die eingespannte Glasröhre, welche unten durch einen Schraubenverschluss oder einfach, wie es später geschah, durch einen Kautschukpropfen, der bis zu einer gewissen in das Glas geritzten

Marke in die Röhre hineingesteckt wurde, geschlossen war, wurde senkrecht gestellt, und die betreffende Flüssigkeit oben eingefüllt; sodann wurde die Kugel in die Flüssigkeit gebracht, etwas von derselben Flüssigkeit wieder nachgegossen, da durch das Einbringen der Kugel etwas Flüssigkeit verdrängt und leicht zuweilen verspritzt wurde, und dann wurde die Röhre, wie unten schon geschehen, auch oben festgeschlossen. Meistentheils blieb von selbst eine kleine Luftblase; wenn nicht, wurde ein wenig Luft eingelassen, um dieselbe als Libellenblase bei der wagerechten Einstellung der Röhre zu benutzen. Dadurch wurde eine besondere Libelle unnöthig gemacht. Der Vorsicht halber, da die Glasröhren nicht ganz genau cylindrisch waren, liessen wir die Blase an verschiedenen Stellen der Röhre zu diesem Zwecke stehen. Die Kreisscheibe, welche etwas verschiebbar war, wurde dann so gestellt, dass ein Zeiger, welcher in der Mitte des mit der Glasröhre parallel laufenden Balkens angebracht war, genau auf 0^0 der Scheibe stand. Sodann wurde noch einmal nachgesehen, ob die Kugel auch genau am Ende der Röhre lag, da sie öfters, auch bei der wagerechten Lage, durch irgend eine kleine Erschütterung schon etwas nach vorn gerollt war. Nun wurde in schneller, aber gleichmässiger und ja nicht stossweise wirkender Bewegung die Röhre von 0^0 in eine Neigung von 5^0, 10^0, 20^0, 30^0 etc. gebracht, und vermittelst eines Chronometers, das halbe Sekunden schlug, die Zeit gemessen, welche die Kugel zur Zurücklegung ihres Weges in der Röhre durch die Flüssigkeit hindurch brauchte. Wie schon gesagt, es kann dieses Verfahren auf den ersten Blick vielleicht ungenau erscheinen, aber man darf nicht vergessen, abgesehen von der oben schon erwähnten Prüfung, dass wir durch eine tausend- und abertausendfache Wiederholung der Methode eine Sicherheit erlangten, die Jemandem beim Anstellen einer ersten Versuchsreihe wohl nicht leicht eigen sein dürfte. So könnte es auch gerathen erscheinen, einen Schieber an der Kreisscheibe so anzubringen, dass man ihn genau auf den Winkel stellt, bis zu welchem man den erwähnten Zeiger und damit die Glasröhre neigen will, weil man sonst leicht etwas über das Ziel hinausgehen oder kurz vor demselben stehen bleiben könnte; allein bei einiger Uebung gelingt es sehr bald, stets den richtigen Punkt zu treffen, bis zu welchem man die Röhre drehen will, und hat man je denselben verfehlt, so ist die Wiederholung des Versuches bei unserer Methode sehr einfach und sehr wenig zeitraubend. Auch würde ein solcher Schieber den Nachtheil haben, dass man leicht an denselben etwas anstiesse und den Apparat erzittern machte, was auf den Gang der Kugel sofort influieren würde.

Unser Verfahren gewährt ferner den Vorzug, dass man durch die entsprechende Neigung der Röhre nach der rechten und linken Seite eine genaue Controlle der Richtigkeit des Resultates hat, falls die Kreisscheibe richtig getheilt ist. So wurde denn auch stets von uns die Röhre von 20°, 30° etc. wieder auf 0° zurückgestellt und dann nach der anderen Seite hin entsprechend geneigt, und dies so oft wiederholt, bis das Resultat auf $\frac{1}{4}$ Secunde stimmte; war dies absolut nicht der Fall, so wurde die Fehlerquelle zu ermitteln versucht oder schliesslich das Mittel genommen. Durch das Drehen der Röhre um ihre eigene Längsaxe um 180°, so dass dadurch die Wandseite, auf der die Kugel lief, gewechselt wurde, war die Beseitigung einer weiteren Fehlerquelle möglich.

Uebrigens ist jede der hunderten von Zahlen, welche nachher folgen, das Mittel aus äusserst vielen Beobachtungen, die meist so lange fortgesetzt wurden, bis sie nach einiger Zeit fast alle ziemlich dasselbe Resultat lieferten. Als Zeitmesser wurde bei den Versuchen, die in dem physikalischen Institute zu Marburg angestellt wurden, ein Chronometer von Kessel benutzt, das halbe Secunden schlug. Ein Uebelstand stellte sich aber sehr bald bei diesem Zählen von halben Secunden heraus, dass nämlich bei einigen Kugeln, namentlich wenn die Flüssigkeit verhältnissmässig geringeren Widerstand bot und so die Kugel rasch hinabrollte, ein solches Geräusch entstand, dass es kaum oder nur sehr schwer möglich war, den Schlag der Uhr dabei zu hören. Dies war aber nöthig, da man den Grad, bis zu welchem man die Röhre neigen wollte, genau im Auge haben und den Gang der Kugel, namentlich die Ankunft derselben unten, genau beobachten musste und desswegen mit den Augen nicht etwa, um diese für das Ohr eintreten zu lassen, zugleich dem Pendel oder Zeiger folgen konnte. Wir gaben uns die grösste Mühe, durch die verschiedensten Mittel diesen rasselnden Lärm der abwärts rollenden Kugel zu dämpfen; aber es half entweder Nichts oder wenig, oder gab zu leicht Veranlassung zu Fehlerquellen. Wir begnügten uns endlich damit, uns von der Ankunft der Kugel unten durch den Schall benachrichtigen zu lassen, der allerdings immer etwas stärker war, da ja die Kugeln, bei denen der Uebelstand auftrat, in dem weniger dichten und daher weniger Widerstand bietenden Mittel stärker aufschlugen; mit dem Auge, das nun freier war, folgten wir dem Pendel oder Zeiger, um die halben Secunden zu zählen. Die Zeit, welche der Schall gebrauchte, um von dem Ende der Röhre bis zu unserem Ohre zu gelangen, konnte getrost vernachlässigt werden, da die Entfernung nur wenige Fuss betrug.

Erst hier, als wir bei einer halbe Secunden schlagenden Uhr, deren Schlag noch leiser war, als der des Chronometers und der Pendeluhr, den Uebelstand noch schmerzlicher empfanden, kamen wir auf den Gedanken, ein sehr laut schlagendes Mälzelsches Metronom zu benutzen, das mit seinem Lärm allerdings das Geräusch der Kugel weit übertäubte und das Zählen uns sehr leicht machte. Freilich wurde uns dieser laute Taktschlag des Metronoms, stundenlang mitangehört und darnach gezählt, oft fast unerträglich. Das Metronom selbst wurde stets vor jeder neuen Reihe von Versuchen sorgfältig nach unserer halbe Sekunden schlagenden Uhr, die wir dem physikalischen Institute zu Marburg entliehen hatten, reguliert. Die zu Marburg gemachten Versuche wurden hier noch einmal mit dem Metronom wiederholt. Es zeigte sich, dass dieselben meist sehr gut stimmten, und da, wo eine Differenz zum Vorschein kam, war die Fehlerquelle zu finden.

Da bei geringen Neigungen, wie 5°, 10°, bei specifisch schweren Flüssigkeiten und specifisch leichten Kugeln, die nicht stark von dem specifischen Gewichte der Flüssigkeit, in der sie sich bewegten, differierten, die Zeitdauer des Laufes der Kugel bisweilen eine solche war, die halbe Stunden betrug, ja über eine Stunde sogar hinaus ging, so wurde in diesem Falle, in welchem das Zählen halber Sekunden nicht durchzuführen war, der Minutenzeiger der betreffenden Uhr, welcher mit dem Sekundenzeiger genau übereinstimmte, beobachtet. Die letzte Minute wurde in halben Sekunden genau gezählt, weil man dann die Ankunft der Kugel, die bei solch' einem langsamen Gang durch kein Geräusch ihre Ankunft verrieth, genau beobachten musste. Da, wie später noch ausführlich gezeigt wird, die Bewegung der Kugel in der Flüssigkeit keine beschleunigte, sondern eine gleichmässige ist, so kann man auch schon nach Beobachtung irgend eines bestimmten Bruchtheils der Länge der Röhre, eine Schätzung der ganzen Zeit vornehmen, welche die Kugel brauchen wird, und so sich auch die letzte Minute schon im Voraus bestimmen, bei der man besonders acht zu geben und wieder zu zählen hat. War die Versuchsreihe nun mit einer Kugel von 0° bis 90° vollendet, so wurde die Kugel herausgenommen, indem wir die Röhre an einem Ende öffneten und dieselbe so viel neigten, dass die Kugel, allerdings mit etwas Flüssigkeit, in eine dicht unter die Oeffnung gehaltene Schale herausfiel. Der Verlust von Flüssigkeit ist soviel als möglich, so lange ein und dieselbe Flüssigkeit untersucht wird, zu vermeiden, da eines Theils durch Hinzugiessen vieler neuer Flüssigkeit die alte möglicher Weise etwas alteriert wird, anderen Theils bisweilen auch finanzielle Gründe, wenigstens

uns, dazu drängten, da Flüssigkeiten, wie Chloroform, Aether u. s. w. nicht allzu billig sind, um viel davon zu vergeuden. Durch die tausendfache Wiederholung ein und derselben Procedur erhält man schliesslich in diesen Manipulationen eine solche Fertigkeit, dass man, ohne der Genauigkeit Eintrag zu thun, ziemlich rasch arbeiten kann. War nun die eine Kugel heraus genommen, so wurde die Röhre senkrecht gestellt, eine andere Kugel in dieselbe gethan, die Röhre wieder mit derselben Flüssigkeit bis zum Ende gefüllt, die Röhre geschlossen und nun in derselben Weise wieder verfahren, die eben beschrieben worden ist. Wurde eine neue Flüssigkeit in die Reihe der Versuche genommen, so wurde natürlich die Röhre zuvor auf das Sorgfältigste und Genaueste gereinigt. Wir liessen zu diesem Zwecke längere Zeit einen Wasserstrom durch sie hindurch gehen, da durch Ausputzen mit Zeug etc. leicht das Glas etwas gerieft werden konnte, was dann leicht zu einer Fehlerquelle Veranlassung gab, da die Kugel auf dem Glase lief. Wenn dies Verfahren auch etwas weitläufig ist, so gewährt es doch eine grössere Sicherheit, als etwa neue Röhren von gleicher Beschaffenheit zu nehmen, die uns auch nicht zu Gebote gestanden hätten.

Die Kugel muss bei jedem Versuche auf der Wand der Röhre durch die Flüssigkeit gleichmässig dahinrollen; sobald ein Zittern oder Schwirren der Kugel, ein Anschlagen an die Wände des Glases, eine hüpfende Bewegung etc. eintritt, ist der Versuch zu wiederholen. Die Zeit, welche die zitternde, schwirrende, hüpfende Kugel zur Zurücklegung ihres Weges braucht, ist nämlich eine bedeutend grössere, als die, welche die gleichmässig rollende gebraucht. Oefters aber kam es vor, dass bei gewissen Kugeln in gewissen Neigungen der Röhre, das Zittern, Schwirren und Hüpfen derselben stets vorkam, sich stets wiederholte, so sorgfältig man auch den Versuch anstellte. Um sicher zu sein, dass nicht etwa diese eigenthümlichen Bewegungen der Kugel durch das schnelle Neigen der Röhre von 0^0 bis zu dem bestimmten Grade herbeigeführt war, wurde die Röhre zunächst ohne die Kugel in die bestimmte Neigung bereits gestellt, und dann die Kugel nach Oeffnung der Röhre sorgfältig mit der Hand los- und heruntergelassen; aber auch dann trat grade so dieses Zittern und Schwirren der Kugel ein, ein deutlicher Beweis, dass diese Erscheinung nicht etwa durch einen Stoss bei der Neigung der Röhre, sondern durch Stösse der Flüssigkeit selbst, die sich zwischen der Kugel und den Glaswänden durchzudrängen versuchte, veranlasst war. War dieses Erzittern und Schwirren der Kugel aber bei einer gewissen Neigung ganz regelmässig und feststehend, so war

dann auch die Zeitdauer bei Wiederholung desselben Versuches so genau dieselbe, als wie bei den anderen Versuchen; die Versuche wurden hierbei grade noch mehr als sonst wiederholt, um ein richtiges Resultat zu erhalten. Daher sind diese Zahlen auch aufgenommen, aber, um sie gegen die andern doch kenntlich zu machen, mit einem † bezeichnet.

Wenn die Luftblase in der Röhre, die wir wie eine Libellenblase benutzten, etwas zu gross wurde, so brachte sie leicht, wenn sie bei der Neigung der Röhre der herabrollenden Kugel entgegen aufwärts zog, durch einen Stoss auf die Kugel bei der Begegnung mit derselben eine solche schwirrende Bewegung hervor; die Luftblase wurde aber leicht etwas grösser, da bei dem Hin- und Herschwenken der Röhre hin und wieder einige Tropfen Flüssigkeit austraten und Luft dafür ein. War dies geschehen, so musste vor Fortsetzung der Versuche erst nachgefüllt werden.

Bei 80° und 90° war aber das Zittern und Schwirren der Kugel in engen Röhren oft so stark und dabei so unregelmässig, dass ein Resultat vermittelst unserer Methode nicht erzielt werden konnte. Es trat aber auch ein, wenn die Röhre ohne Kugel zuvor senkrecht gestellt und dann die Kugel erst in ihr fallen gelassen wurde. Ueberhaupt sind auch die Resultate bei 80° und 90°, welche noch aufgenommen wurden, doch nicht der Art, dass sie ebenso gut und brauchbar wären, als die von den vorhergehenden Graden. Fast waren wir geneigt, sie wegzulassen und nur die Resultate von Neigungen bis 70° hier aufzuführen; aber der Vollständigkeit wegen sind sie doch geblieben. Auch ist es schon desswegen bedenklich, sie mit den anderen Zahlen zusammen zu stellen, da bei Neigungen von 0° bis 70° die Kugel sicher auf der Glaswand rollt, aber bei 90° meist ohne Reibung an der Glaswand einfach durch die Flüssigkeit fällt, was auch schon bei 80° bisweilen vorkommt.

Die stärksten Differenzen bei demselben Versuche zeigten sich bei der geringen Neigung von 5°, wenn die specifisch leichtesten Kugeln in den specifisch schwersten Flüssigkeiten sich bewegten. So ergaben sich z. B., wenn die Elfenbeinkugel vom kleinsten Durchmesser in einer Zuckerlösung von 1,2 spec. Gew. in der Röhre II bei einer Neigung von 5° hinabrollte, folgende Resultate: 390″ (eigentlich halbe Sekunden), 360″, 400″, auch bei 10° noch: 153″, 164″, 176″; wenn die Steinkugel vom grössten Durchmesser sich in Zuckerlösung von 1,2 spec. Gew. in Röhre I bewegte bei 5°: 228″, 242″, 220″, 248″; wenn die Elfenbeinkugel (D.) vom grössten Durchmesser sich in Salzlösung von 1,2 spec. Gew. in der Röhre I bewegte, kamen Differenzen von

278″ und 254″ vor. Solche Resultate in den Tabellen, welche das Mittel aus sehr stark differierenden Beobachtungen sind, sind mit einem — unter den betreffenden Zahlen bezeichnet.

Was ist aber die Ursache dieser starken Differenzen, die in Beobachtungsfehlern nicht mehr begründet sein können? Bei Neigungen von 20°, 30° u. s. w. verschwinden dieselben, sie müssen also darin ihren Grund haben, dass bei einer Neigung von 5° die Wirkung der Schwer-Kraft eine sehr geringe ist, so dass die kleinsten Veränderungen des Widerstandes, wie etwa Erhöhung der Reibung auf der Glaswand durch geringste Staubtheilchen, sehr kleine Verschiedenheiten der Glaswand selbst etc. dann schon im Stande sind, sehr starke Differenzen hervorzurufen.

Auch wurde eine Versuchsreihe wegen der Frage angestellt, ob sich etwa ein Unterschied herausstelle, wenn entweder die Kugel eben unmittelbar aus der sie umgebenden Luft in die Flüssigkeit der Röhre kommt oder wenn sie schon längere Zeit in der Flüssigkeit der Röhre gelegen hat und dann zu den Versuchen dient. Es konnte nämlich vermuthet werden, dass die Luftschicht, welche jedem Körper sehr innig adhärirt, hierbei eine gewisse Rolle spiele. Wir liessen in den wenigen Fällen, in denen sich solche starke Verschiedenheiten gezeigt hatten, die Elfenbein-, wie die Hartgummikugel, nachdem eine Reihe von Versuchen mit denselben gemacht worden war, die Nacht über in der Röhre, die mit Wasser, Zucker- oder Salzlösung gefüllt war, liegen. Nachdem die Kugeln so länger als 12 Stunden in der Flüssigkeit gelegen hatten, wurden die Versuche wiederholt, ergaben aber widersprechende Resultate, so dass hierin wohl nicht der Grund der Abweichungen zu suchen war.

Trotzdem soll bei einer weiteren Fortsetzung unserer Arbeit dieser Umstand doch noch einmal ins Auge gefasst und untersucht werden. Uebrigens hat sich, wie schon gesagt, eine so starke Verschiedenheit der Zeiten bei sonst gleichen Verhältnissen nur in wenigen Fällen gezeigt, die sämmtlich namhaft gemacht sind.

Es wurden ferner längere Beobachtungsreihen angestellt, um zu untersuchen, ob eine Aenderung der Temperatur der Flüssigkeit um einige, etwa 2° bis 3°, wie sie wohl bei einzelnen Versuchen vorkam, von Einfluss sei. Konnte dieser Einfluss als verschwindend vernachlässigt werden, so erleichterte dieses die Versuche sehr, da die Flüssigkeit während des Versuchs ihre Temperatur öfters etwas änderte. Es ergab sich, dass selbst noch stärkere Temperaturdifferenzen keinen bestimmten Einfluss ausübten, also die Schwankungen der Temperatur während des Versuchs vernachlässigt werden

konnten. Indess wurde doch nicht versäumt, die Temperatur der Luft, wie die der Flüssigkeit bei dem Anfang und dem Ende einer Reihe von Versuchen aufzuschreiben.

Theoretisch müssen wir allerdings annehmen, dass diese Unabhängigkeit von dem Einflusse der Temperatur wohl nur begründet ist in der Natur des Apparates, der solche geringe Aenderungen der Zeitdauer nicht mehr zeigen kann, denn die Wärme übt doch sicherlich auf den Flüssigkeitszustand des Mittels einen Einfluss aus, welcher wiederum auf den Widerstand influiert. Auch diese Frage soll bei einem zweiten Theil unserer Untersuchungen noch besonders erörtert werden, indem Versuche mit Flüssigkeiten, die einmal auf 0° stehen und dann bis zum Siedepunkt fast erhitzt werden, gemacht werden sollen. Solche starke Temperaturdifferenzen werden sicherlich von Einfluss sein.

Der Barometerstand ist nicht bemerkt worden, da wir nur mit tropfbaren Flüssigkeiten Versuche angestellt haben, bei welchen, namentlich bei unserem Apparate, dieser Einfluss des Luftdrucks vollkommen verschwindend sein musste.

§. 5.

Die bei den Versuchen benutzten Kugeln.

Um recht verschiedene specifische Gewichte zu haben, wurden nach längerer Prüfung und Auswahl aus folgenden 5 Körpern Kugeln angefertigt, aus Blei, Zink, Stein (Kohlensaurer Kalk), Elfenbein und Hartgummi. Aus diesen Massen wurden je fünf Kugeln von drei verschiedenen Durchmessern gemacht, so dass also stets je drei Kugeln von derselben Masse, aber verschiedenem Durchmesser, und je fünf Kugeln von demselben Durchmesser, aber verschiedenem specifischen Gewicht vorhanden waren.

Dass die absolute Kugel nur ein mathematischer Begriff ist, dem sich die vom Mechanikus aus Stoff gefertigte nur so viel als möglich zu nähern versucht, wird man immer wieder inne, wenn man darnach strebt, so viel als möglich absolut runde und gleiche Kugeln zu erhalten, wie sie für unsere Zwecke nothwendig waren. Es kostete nicht wenig Mühe, dieselben herzustellen. Die Gleichheit derselben wurde, abgesehen von direkten Messungen, auch dadurch geprüft, dass bei gleichem Durchmesser jede der fünf Kugeln denselben Gewichtsverlust im Wasser, bei Bestimmung des spec. Gew., erfahren musste. Die Bestimmung des spec. Gew., die für jede Kugel, auch aus derselben Masse, da bei Bearbeitung derselben Masse dasselbe sich doch etwas geändert

haben konnte, besonders geschah, war Anfangs vermittelst des Nicholson'schen Aräometers ausgeführt worden; da dasselbe aber zu wenig genaue Angaben lieferte, so wurde das spec. Gew. noch einmal vermittelst einer ausgezeichneten hydrostatischen Wage bestimmt, die mir Professor Dr. Schmidt, damals Lehrer der Chemie an der hiesigen Polytechnischen Schule, aus seinen Privatschätzen zur Benutzung freundlichst überliess.

Der Durchmesser der grössten Kugeln, die wir in den Versuchsreihen mit A, B, C, D, E bezeichnen wollen, betrug nach directer Messung vermittelst eines Tasters 18,0 Millimeter, der Durchmesser der mittleren Kugeln, die wir mit a, b, c, d, e bezeichnen, 12,0 Millimeter, der der kleinsten, welche die Bezeichnung α, β, γ, δ, ε führen mögen, 9,5 Millimeter. Das absolute Gewicht der Kugeln in Grammen folgt in nachstehender Tabelle:

A, B, C, D, E Kugeln, deren Durchmesser = 18,0 mm.

Die Kugeln.	Absolutes Gewicht in Grammen.	Specifisches Gewicht.	Gewichtsverlust im Wasser in Grammen.
A. Bleikugel	36,538	11,25	3,249
B. Zinkkugel	23,056	7,0	3,296
C. Steinkugel (Kohlens. Kalk) . .	8,770	2,71	3,193
D. Elfenbeinkugel	5,701	1,77	3,257
E. Hartgummikugel	4,055	1,25	3,232

a, b, c, d, e Kugeln, deren Durchm. = 12,0 mm.

Die Kugeln.	Absolutes Gewicht in Grammen.	Specifisches Gewicht.	Gewichtsverlust im Wasser in Grammen.
a. Bleikugel	11,246	11,37	0,990
b. Zinkkugel	6,942	7,05	0,985
c. Steinkugel	2,610	2,71	0,990
d. Elfenbeinkugel	1,761	1,75	0,998
e. Hartgummikugel	1,256	1,26	0,994

α, β, γ, δ, ε Kugeln, deren Durchmesser = 9,5 mm.

Die Kugeln.	Absolutes Gewicht in Grammen.	Specifisches Gewicht.	Gewichtsverlust im Wasser in Grammen.
α. Bleikugel	4,880	11,43	0,427
β. Zinkkugel	3,084	7,20	0,427
γ. Steinkugel	1,129	2,70	0,420
δ. Elfenbeinkugel	0,772	1,79	0,427
ε. Hartgummikugel	0,540	1,28	0,425

Eine Betrachtung der Columnen 3 in vorstehender Zusammenstellung zeigt, dass die je fünf Kugeln sehr nahe dieselbe Flüssigkeitsmasse verdrängt haben; d. h. dass dieselben in ihrem Durchmesser sehr nahe gleich sind, was die Sorgfalt beweist, welche der Mechanikus Süss in Marburg auf die Anfertigung derselben verwandt hat.

§. 6.

Die Flüssigkeiten der einzelnen Versuchsreihen.

Zunächst wurde chemisch reines Wasser zur Füllung der Röhren verwandt, wie auch solches, welches nur sehr wenig mineralische Bestandtheile noch enthält, wie nachgewiesener Massen das hiesige sog. Zaitenwasser, nachdem sich herausgestellt hatte, dass diese ohne Einfluss auf den Versuch waren. Sodann wurde eine ganz concentrierte Lösung von Kochsalz (Na. Cl.) in Wasser dargestellt. 100 Gewichtstheile Wasser lösen 36 Gewichtstheile Kochsalz bei gewöhnlicher Temperatur (bei 100° C. steigert sich die Löslichkeit nur unbedeutend.) Daher enthalten 100 Theile einer bei gewöhnlicher Temperatur gesättigten Lösung 26,5 Theile Kochsalz. [1]) Nach den Tabellen über das specifische Gewicht von Gerlach hat eine Kochsalzlösung von 26,395% das specifiscche Gewicht 1,20433. Wir können also für unsere Versuche das specifische Gewicht einer gesättigten Kochsalzlösung = 1,20 betrachten. Da sich nun eine solche sehr leicht immer wieder von Neuem darstellen lässt, so wählten wir dieselbe zu einer zweiten Reihe von Versuchen, bei denen alles andere, wie Kugeln, Röhren etc. genau dasselbe blieb. Uebrigens wurde nie versäumt, das specifische Gewicht der Lösung vor und nach der Einfüllung der Flüssigkeit in die Röhre mit dem Aräometer zu bestimmen. Für unsere Zwecke und unseren Apparat genügt wohl die Bestimmung des specifischen Gewichts vermittelst des Aräometers, zumal oft auch durch Tabellen eine Controlle des spec. Gew. gegeben war; auch liess diese Methode bei jedem neuen Versuche eine rasche und häufige Wiederholung zu, die bei den so zahlreichen Versuchsreihen sehr wünschenswerth war.

Ferner wurde dargestellt neben der concentrierten Kochsalzlösung eine concentrierte Zuckerlösung genau von demselben specifischen Gewichte, um eben zu prüfen, ob Lösungen von demselben specifischen Gewichte denselben Widerstand etc. ausübten oder nicht.

---

[1]) cf. Graham Otto Lehrbuch der Chemie Bd. II. pag. 266.

Die nächste Flüssigkeit, welche verwandt wurde, war Alkohol. Der Alkohol[1]) ist eine wasserhelle, farblose, leicht bewegliche, flüchtige Flüssigkeit, welche selbst durch die höchsten Kältegrade, die sich künstlich hervorbringen lassen, nicht hat zum Erstarren gebracht werden können. Er ist ein schlechter Leiter der Electricität, siedet bei 78,4° C. und hat bei mittlerer Temperatur (+ 15° C.) ein spec. Gewicht von 0,7939, bei 0° C. von 0,8095. Er ist mit Wasser in allen Verhältnissen mischbar. Der Alkohol unserer Versuchsreihen war nicht ganz absoluter, sondern zeigte nach dem Normalalkoholometer von Tralles 99% bei 13½ R., während allerdings das Alkoholometer von Tralles auf 12½ R. basiert ist. Nach den Tabellen von Tralles hat 99% Alkohol ein spec. Gewicht von 0,7988, daher wir das spec. Gewicht des Alkohols unserer Versuchsreihen = 0,8 nehmen, wie auch direkte Messungen desselben mit dem Beck'schen und anderen Aräometern dasselbe Resultat zeigten. Sodann wurde darnach gestrebt, womöglich eine der specifisch leichtesten Flüssigkeiten bei den Versuchen zu verwerthen. Nach längerem Suchen wurde Petroleumäther, wie er in der Apotheke bezeichnet wurde, als eine der leichtesten Flüssigkeiten gefunden. Die Bestimmung des spec. Gewichtes, die mit den vorhandenen Aräometern nicht mehr ausgeführt werden konnte, da sie nur bis 0,7 gingen und in dieser Flüssigkeit noch tiefer einsanken, wurde vermittelst des Pyknometers gemacht und ergab 0,695 bei 16° C. Eine leichtere Flüssigkeit ist uns bis jetzt noch nicht bekannt geworden. Eine Arbeit über diesen Körper haben wir noch nicht finden können; schwerlich möchte derselbe ein einfacher sein; eine Untersuchung über denselben anzustellen, reichte unsere Zeit bis jetzt noch nicht hin.

Sehr viel Mühe kostete es uns, bis wir eine Flüssigkeit hatten, die das spec. Gewicht 2,0 hatte, da die Stoffe, aus denen unsere Kugeln bestanden, wie Blei, Zink u. s. w. den Gebrauch von Säuren, wie Schwefelsäure, Salpetersäure etc. ausschlossen.

Wir stellten endlich eine Chlorzinklösung dar, deren spec. Gewicht sogar noch etwas über 2,0 hinaus ging. Dieselbe wurde erhalten durch Behandlung von Zink mit Chlorwasserstoffsäure. Der Siedepunkt dieser Chlorzinklösung liegt sehr hoch. Wir stellten durch den nöthigen Zusatz von Wasser mehrere Lösungen von verschiedenem spec. Gewichte dar; das höchste spec. Gewicht betrug 1,95, darnach folgt eine Lösung von 1,51, um mit Chloroform, das auch zur Anwendung kam, wie gleich erwähnt werden wird, und ein spec. Gew. 1,51 besitzt, eine gleich schwere, aber ganz

[1]) cf. Kolbe, Organische Chemie. Bd. I. p. 93.

anders beschaffene Flüssigkeit zu haben, sodann wurde nur versuchsweise eine Lösung von 1,45 angewandt und schliesslich eine von 1,2, um noch mit den schon erwähnten Salz- und Zuckerlösungen, eine dritte von gleichem spec. Gewicht, aber anderer Beschaffenheit zu haben.

Da das Chlorzink wegen seiner ätzenden Wirkung [die ihm ja auch eine Verwendung in der Medicin verschafft hat], die Hände etwas angreift, so ist das Arbeiten mit demselben bei unseren Versuchen nicht so angenehm, wie mit den anderen Flüssigkeiten, doch wussten wir keine bessere an die Stelle zu setzen. Die Berührung der Flüssigkeit mit den Händen lässt sich aber bei der grössten Sorgfalt nicht vermeiden.

Eine letzte Flüssigkeit, die wir zu einem kleineren Theil von Versuchen anwandten, war Chloroform. Das Chloroform ist eine farblose, im Wasser unlösliche, darin schnell zu Boden sinkende, sehr flüchtige Flüssigkeit, siedet bei 62° C. und hat ein spec. Gew. von 1,50 bei 15,5° C., 1,525 bei 0°. Die Dampfdichte ist = 4,192. Ungeachtet seiner Flüchtigkeit ist es nur schwer entzündlich, man kann der Flüssigkeit einen brennenden Körper nähern, ohne dass sie entflammt. (Wir mussten hierauf achten, da wir in den späteren Monaten des Jahres öfters bei offenem Gaslicht arbeiteten; namentlich Petroleumäther bedurfte in dieser Hinsicht einer sorgsamen Behandlung.) Grade wegen seines verhältnissmässig hohen spec. Gewichtes und wegen seiner Flüchtigkeit und Beweglichkeit war auch Chloroform von uns in den Kreis der Beobachtung gezogen worden.

Da das Chloroform bekanntlich, mit etwas atmosphärischer Luft eingeathmet, in kurzer Zeit Bewusst- und Gefühllosigkeit hervorruft, so muss man bei den Versuchen mit dieser Flüssigkeit die nöthige Vorsicht walten lassen. Auch müssen die Röhren sehr gut geschlossen werden, um eine Verdunstung des äusserst flüchtigen Stoffes zu verhindern. Wir zogen noch über den Messingverschluss der kleinen Röhre von 13,3 m m. Stücke von eng anschliessenden Kautschukröhren, die vollkommen luftdicht schlossen und auch der auflösenden Kraft des Chloroforms während der Dauer des Versuchs Widerstand leisteten. Diese viele Körper auflösende Kraft des Chloroforms ist allerdings bei den Versuchen nicht ausser Acht zu lassen, denn einst, als wir das Chloroform einige Tage in der Röhre stehen gelassen hatten, da wir verhindert wurden, die Versuche gleich wieder, wie beabsichtigt war, fortzusetzen, so hatte dasselbe das Siegellack, mit welchem der Messingverschluss auf die Glaswand gelöthet war, wie das Kautschuk aufgelöst und war fast ganz entwichen.

Da das specifische Gewicht von Hartgummi, aus welchem ein Theil der Kugeln gefertigt ist, 1,26 beträgt und also geringer ist als das spec. Gew. von der koncentrierten Chlorzinklösung und von Chloroform, so würden die Kugeln in diesen Flüssigkeiten aufsteigen, statt wie sonst hinabzurollen; zunächst ist diese Art von Versuchen ausgeschlossen worden, um die Aufgabe nicht noch verwickelter zu machen; obwohl es sehr interessant wäre zu untersuchen, ob die Zeitdauer unter sonst gleichen Bedingungen dieselbe wäre. Bei einer weiteren Verfolgung der Versuche soll auch diese Modifikation ins Auge gefasst werden.

§. 7.

Die bei den Versuchen verwandten Röhren.

Die Länge aller Röhren betrug 1555,6 Millimeter, der Durchmesser der Röhre I mit der Dicke der Glaswände im Durchschnitt 25,5$^{mm.}$, er stieg bis zu 26,0$^{mm.}$ und fiel bis 25,0$^{mm.}$ So lange Glasröhren von überall genau gleichem Durchmesser zu bekommen, ist nicht möglich, von einer grossen Anzahl derselben, aus denen uns die Wahl zu Gebote stand, waren die erwähnten noch bei Weitem die besten. Die Dicke der Wände betrug 2$^{mm.}$, so dass also der Durchmesser der Oeffnung 21,5$^{mm.}$ beträgt bei der Röhre I.

Der Durchmesser der Röhre II beträgt im Durchschnitt 17,1$^{mm.}$, das Maximum 17,3$^{mm.}$, das Minimum 16,9$^{mm.}$, die Dicke der Glaswände 1,9$^{mm.}$, so dass also der Durchmesser der wirklichen Oeffnung 13,3$^{mm.}$ ausmacht.

Stellt man den Durchmesser der drei Kugelsorten mit dem Durchmesser der Röhren zusammen, so sind die Zwischenräume zwischen den Kugeln und der Glaswand, auf der sie sich nicht bewegen, folgende: in der Röhre I für die Kugeln von 18,0$^{mm.}$ Differenz: 3,5$^{mm.}$, für die Kugeln von 12,0$^{mm.}$ D.: 9,5$^{mm.}$, für die Kugeln von 9,5$^{mm.}$ D.: 12,0$^{mm.}$; in der Röhre II können die Kugeln der grössten Sorte nicht mehr verwandt werden, da ihr Durchmesser bereits 4,7$^{mm.}$ grösser ist als der Durchmesser der Röhre II, für die Kugeln der mittleren Sorte beträgt die Differenz 1,3$^{mm.}$, für die der kleinsten Sorte 3,8$^{mm.}$

§. 8.

Gleichmässige Bewegung der Kugeln in den Röhren.

Die Glasröhren wurden, um zu ermitteln, ob die Kugeln sich mit gleichmässiger Geschwindigkeit oder nicht durch die Röhren bewegten, genau in vier gleich lange

Abschnitte getheilt, welche durch Fäden, die in diese Marken, welche in das Glas geritzt waren, gelegt wurden, leicht kenntlich waren. Bei jeder Beobachtung konnte so zu gleicher Zeit neben anderen Zwecken festgestellt werden, ob die Kugel in gleichen Zeiten diese gleichen Räume durchlaufe oder mit beschleunigter Geschwindigkeit. Es stellte sich heraus, dass alle Kugeln in allen Flüssigkeiten und Röhren die gleichen Räume in derselben Zeit bei jeder Neigung durchliefen, so dass später, als dieses einmal feststand, die Beobachtung dieser Viertel der Zeiten als Controlle für die ganze Zeitdauer diente. Oft gewährte uns auch dieses Gesetz, da das fortwährende Zählen bei sehr langen Zeiten stark ermüdete, eine gewisse Unterhaltung und Spannung, ob die Kugel zu der voraus bestimmten Zeit, die aus einem Viertel ermittelt worden war, auch wirklich an den bestimmten Marken anlangte.

Es war dieses Resultat auch von vorn herein zu erwarten; denn schon Newton hatte ja das Gesetz aufgestellt, dass der Widerstand sich nahezu wie das Quadrat der Geschwindigkeit verhalte, ein Gesetz, das durch die weiteren Arbeiten auf diesem Gebiet zwar etwas modificiert wurde, im Wesentlichen aber das Hauptresultat aller dieser Arbeiten bildet. Es muss also für jeden Körper, der sich mit fortdauernder Beschleunigung in irgend einem Medium, auch der Luft oder irgend welchen Gasarten bewegt, der Zeitpunkt eintreten, wo der Widerstand so weit gewachsen ist, dass er der beschleunigenden Kraft gleich ist und von diesem Moment an muss die Bewegung eine gleichmässige sein. Bei unsern Versuchen ist der Widerstand von Anfang an so bedeutend und die beschleunigende Kraft so gering, dass dieser Moment sehr rasch eintritt.

Dasselbe sahen wir ja schon bei den Versuchen der schwedischen Gelehrten Lagerhielm, Forselles, Kallstenius, die Kugeln im Wasser senkrecht fallen liessen und dabei fanden, dass selbst hier die Beschleunigung so gering war, dass sie mit Recht die Bewegung als eine gleichmässige betrachten konnten.

§. 9.

Theoretische Betrachtungen über die aus den Zahlen sich ergebenden Resultate.

Die Kugel muss, indem sie durch die Flüssigkeit sich bewegt, den Theil derselben, in dessen Raum sie eindringt, zunächst verdrängen. Dieser verdrängte Theil wird also nach vorn, nach oben und unten, zur Seite gedrückt und die Kraft, welche nöthig ist, dieses zu bewirken, giebt den Widerstand, welchen die Flüssigkeit leistet.

Indem die Kugel sich aber weiter bewegt, entsteht hinter ihr ein leerer Raum, den sie früher mit ihrem Volumen erfüllte. In diesen dringt die Flüssigkeit natürlich wieder ein, erhält dadurch eine gewisse Bewegung und wird mit der durch diese Bewegung erzeugten Kraft auf die hintere Seite des Körpers stossen und dadurch dessen Bewegung etwas beschleunigen. Diese Kraft wirkt also dem Widerstand der Flüssigkeit entgegen. Es ist denkbar, dass der Körper sich so rasch bewegt, dass er von diesem Stosse der in seinen früheren Raum einströmenden Flüssigkeit nicht mehr berührt wird. Mit grösserer Schnelligkeit der Bewegung wird also dieser Einfluss sich vermindern und schliesslich verschwinden. Dieser Minus-Widerstand wird also, während der positive dem Quadrate der Geschwindigkeit proportional ist, der Geschwindigkeit des Körpers umgekehrt proportional sein, wird sich aber schwerlich je unter ein bestimmtes Gesetz bringen lassen, da die Funktionen zu verwickelt sind, von denen er abhängt. Sicherlich ist die Natur der Flüssigkeit dabei auch von grosser Bedeutung, die, je leichter beweglich, um so rascher in diesen Raum eindringt. Verfolgen wir zunächst die Flüssigkeit weiter, welche von der Kugel nach allen Seiten hin verdrängt wird. Dieselbe wird nothwendig nach allen Seiten hin durch die Wandungen der geschlossenen Röhre am Ausweichen behindert. Sie kann nur so Platz machen, indem sie oder die ihr zunächst liegende Schicht von Flüssigkeit, welche durch dieselbe bewegt wird, sich zwischen der Kugel und den Wänden der Glasröhre, der Kugel entgegen, nach oben zu hindurchdrängt und hier dann, wie oben erwähnt, in den von der Kugel eben verlassenen Raum eindringt. (Das Geschlossensein der Röhre oben und unten ist natürlich auch von Bedeutung, da hierdurch ein Ausweichen der Flüssigkeit nach vorn unmöglich ist.) Diese Bewegung der Flüssigkeit wird natürlich um so langsamer geschehen können, je geringer dieser Raum zwischen der Kugel und der oberen Wand der Glasröhre ist. Sobald er verschwindend klein wird, kann gar keine Bewegung der Kugel mehr erfolgen.

Hierin liegt also zumeist der Einfluss des Durchmessers der Röhre auf die Schnelligkeit der in ihr sich abwärts bewegenden Kugel begründet. Von unseren Versuchsreihen werden zunächst diejenigen ins Auge zu fassen sein, in welchen dieselbe Kugel in derselben Flüssigkeit bald in Röhre I, bald in Röhre II rollt. Bei diesen Versuchsreihen ist eben Alles dasselbe, nur der Durchmesser der Röhre hat sich geändert. Der Durchmesser der Röhre I beträgt 21,5^{mm}., der Durchmesser der Röhre II 13,3^{mm}. (cf. §. 7.)

In den beiliegenden Tabellen XII—XVII ist jedesmal für dieselbe Kugel in der ersten Reihe die Zeit bezeichnet, welche sie in der Röhre II und in der darunter stehenden Reihe die, welche sie in Röhre I braucht. Es kommen natürlich bloss die Kugeln von dem mittleren Durchmesser 12,0^{mm} und dem kleinsten Durchmesser 9,5^{mm} in Betracht; die ersten sind mit a, b, c, d, e, die letzteren mit α, β, γ, δ, ε, der verabredeten Bestimmung gemäss bezeichnet.

(Die Steinkugel ist weggeblieben, da uns die mittlere bei einem Versuche mit Salpetersäure verunglückte, indem sie sich, statt, wie vorausgesetzt, eine kieselsaure Verbindung zu sein, als kohlensaurer Kalk erwies und in der Säure sich desshalb auflöste. Da wir nicht eine genau gleiche an die Stelle setzen konnten, so liessen wir die letzten Versuchsreihen mit dieser Kugel lieber weg, als weniger genaue an ihre Stelle treten zu lassen.) Da wir bis jetzt noch keine Röhre von einem grösseren Durchmesser als dem von 21,5^{mm} angewandt haben, so konnten die Kugeln A, B, C, D, E von dem grössten Durchmesser in diese Tabelle noch nicht aufgenommen werden.

Die letzte Tabelle XVII giebt die Resultate aus diesen zusammengestellten Reihen in folgender Weise: dividirt man jedesmal die Zahlen der ersten Reihe einer Kugel durch die Zahlen der zweiten Reihe, so erhält man, wie viel mal die Zeit der Kugel in Röhre I die Kugel in Röhre II braucht. Diese längere Zeitdauer kann nur herrühren von dem Einflusse des Durchmessers der Röhre, da ja alles Andere, wie Kugel, Flüssigkeit u. s. w. genau dasselbe geblieben ist.

Das Mittel aus den 8 Werthen von 5°—70° giebt die dastehende Zahl. Darüber steht der Namen der Flüssigkeit, mit welcher beide Röhren gefüllt waren. Die Werthe von 80° und 90° sind aus den schon oben angeführten Gründen, da sie keinen Anspruch auf grosse Genauigkeit machen können, nicht mit in Rechnung gezogen.

Für die Kugeln α, β, γ, δ, ε, von dem kleinsten Durchmesser ist diese Zahl für jede Flüssigkeit und jede Kugel aus verschiedenen Stoffen so ziemlich dieselbe, im Mittel 1,5; d. h. also, dieselbe Kugel braucht in der engeren Röhre II, durch dieselbe Flüssigkeit hindurchgehend 1,5 der Zeit, welche bei ihrem Lauf durch die weitere Röhre I verfliesst. Anders stellt sich dies Resultat aber für die Kugeln a, b, c, d, e von dem grösseren, mittleren Durchmesser heraus: Bei der Zuckerlösung gebraucht die a Bleikugel in Röhre II 3,2, die a Elfenbeinkugel 4,4, die a Hartgummikugel sogar 6,0 der Zeit in der Röhre I, während bei den übrigen Flüssigkeiten die Elfenbein- und Hartgummikugel durchaus nicht stärker

von dem Durchmesser der Röhre beeinflusst wird, als die Blei- und Zinkkugel, eher etwas geringer. Es muss also die Ursache dieses stärkeren Einflusses in Eigenschaften der Zuckerlösung in Beziehung auf die genannten Kugeln begründet liegen, aber in welchen ist uns bis jetzt nicht klar geworden; selbst die Zeit, welche der specifisch so leichte und so bewegliche Aether beim Durchdrängen zwischen Glaswand und Kugel in der engeren Röhre II braucht, ist nicht geringer als die von Wasser und selbst Salzlösung gebrauchte, wie die Tabelle ausweist, obwohl man von vornherein dies vermuthen sollte.

Vergleicht man die einfachen Durchmesser der Röhren mit einander, so ergiebt der Durchmesser der Röhre I, dividirt durch den Durchmesser der Röhre II 1,6, eine Zahl, die ziemlich mit 1,5, welche die grössere Zeitdauer ergiebt, stimmt, so dass also für die kleinsten Kugeln α, β, γ, δ, ε das Gesetz so lauten würde: die Zeiten verhalten sich umgekehrt wie die Durchmesser der Röhren.

Aber für die grösseren Kugeln von 12$^{mm.}$ Durchmesser gilt das Gesetz schon nicht mehr; bei diesen ist die grösste Entfernung der oberen Glaswand von der Kugel in Röhre II nur 13,3$^{mm.}$ — 12,0$^{mm.}$ = 1,3$^{mm.}$, in der Röhre I 21,5$^{mm.}$ — 12,0$^{mm.}$ = 9,5$^{mm.}$ Der Einfluss des Durchmessers der Röhre wird sich hier schon viel bedeutender zeigen müssen. Dividirt man das Quadrat des Durchmessers der I. Röhre durch das Quadrat des Durchmessers der II. Röhre, so erhält man 2,6, eine Zahl, die mit dem Mittel aus den Zahlen 2,7, 2,6 u. s. w. ziemlich stimmt, wenn man, wie schon früher erwähnt wurde, von den Werthen für die Zuckerlösung absieht.

Bei den grösseren Kugeln und dem geringen Spielraum derselbzn zwischen sich und Glaswand treten sicher auch schon kapillare Erscheinungen auf, welche den Vorgang dann noch verwickelter machen.

Betrachten wir ferner den Einfluss der Flüssigkeit, bei sonst gleichen Bedingungen, auf den Gang der Kugel, so ergiebt sich auf den ersten Blick, dass das specifische Gewicht der Flüssigkeiten zwar gewiss von bedeutendem Einflusse, aber keineswegs, wie angenommen wird, allein massgebend für den Widerstand ist. Man braucht nur für irgend einen bestimmten Grad die Zahlen in den Tabellen zu betrachten, welche die Zeitdauer von dem Lauf derselben Kugel in derselben Röhre durch Zuckerlösung von 1,2 spec. Gew. und Salzlösung von 1,2 spec. Gew., oder durch Chlorzinklösung von 1,5 spec. Gew. und Chloroform von genau demselben spec. Gew., oder durch verdünntere Chlorzinklösung von 1,2 spec. Gew. und der koncentrierten Kochsalz-

lösung von 1,2 spec. Gew. angeben. Nirgends zeigt sich bei sonst ganz gleichen Bedingungen dieselbe Zahl. (Nur einmal bei b. Zinkkugel in der engeren Röhre II bei 20° zeigt sich dieselbe Zahl 30″, doch beruht diese einzige Ausnahme wohl auf einem Beobachtungsfehler.)

Ja der Widerstand des Chloroforms von 1,51 spec. Gew. ist viel geringer als der der Zuckerlösung von 1,2 spec. Gew. und meist auch geringer als der der Kochsalzlösung von 1,2 spec. Gew., so dass also selbst eine Flüssigkeit von weit höherem specifischen Gewichte einen geringeren Widerstand unter Umständen der durch sie hindurchrollenden oder fallenden Kugel darbietet, als die von geringerem specifischen Gewichte.

Diese Thatsache widerspricht also dem Satze, dass der Widerstand proportional dem spec. Gewichte der Flüssigkeit ist, denn die etwaige Verschiedenheit der Adhäsion kann so bedeutend nicht sein, um solche Differenzen zu veranlassen.

Es folgt diese Erscheinung aber auch ganz natürlich aus dem Wesen der Flüssigkeit. Der Zustand der Flüssigkeit (Flüssigkeit hier als Bezeichnung des Zustandes, nicht des Körpers selbst gefasst), ist ein relativer, ein Körper (um hier den Ausdruck „eine Flüssigkeit“ im anderen Sinne zu vermeiden), ist flüssiger als der andere, wenn sie auch beide flüssig sind.

Das Wesen der Flüssigkeit besteht überhaupt darin, dass die Theile des flüssigen Körpers, durch Reibung nicht gehindert, leicht sich übereinander verschieben, und der Grad dieses leichten Verschiebens kann, bei sonst ganz gleich schweren Flüssigkeiten, sehr verschieden sein. Flüssiges Wachs, flüssiges Siegellack, geschmolzenes Pech zeigen einen ganz anderen Grad der Fluidität (wenn wir uns diesen Ausdruck für „Flüssigkeit“ als Bezeichnung eines physischen Zustandes erlauben dürfen), als Wasser, Aether, Alkohol.

Erklärung der Tabellen,

in welchen die sämmtlichen bei den Versuchsreihen erhaltenen Zahlen niedergelegt sind.

Um die Uebersicht zu erleichtern, haben wir die sämmtlichen Zahlenresultate hier in Tabellen zusammengestellt, aus denen die schon mitgetheilten Schlüsse gefolgert sind. Es ist bei der grossen Menge von Zahlen nicht ganz leicht, den Zweck der Uebersichtlichkeit vollständig zu erreichen, und man kann die hierzu nöthige Zusammenstellung nach verschiedenen Principien vornehmen. Einmal kann man im Auge haben, vor allen Dingen klar zu sehen, welchen Einfluss die verschiedenen Flüssigkeiten bei sonst gleichen Bedingungen haben, oder welchen Einfluss der verschiedene Durchmesser der Röhren bei gleichen Kugeln und Flüssigkeiten übt, oder wie die Verschiedenheit der Kugeln bei sonst gleichen Verhältnissen wirkt. Ausserdem wiederholen sich sämmtliche Versuche für die angegebenen Grade der Neigung von 5°, 10°, 20°—90°.

Flüssigkeit, Röhre, Kugel und der Grad der Neigung sind die Elemente, welche wechseln, und deren klare Uebersicht wohl zugleich nicht gut erreicht werden kann, da bei einer Zusammenstellung in einer Tabelle, wie sie von uns übrigens auch gemacht worden ist, die Menge der Zahlen einen erdrückenden und verwirrenden Einfluss übt.

Die ersten zehn Tabellen enthalten stets bloss die Uebersicht der Zahlen für ein und dieselbe Neigung der Röhre; der Grad der Neigung ist jedesmal zuoberst angegeben, die linke Seite enthält nur Resultate, die gewonnen sind mit der Röhre I, die rechte nur solche mit der Röhre II. Vertikal untereinander stehen die Zahlen für dieselbe Flüssigkeit, aber verschiedene Kugeln; horizontal die Zahlen für die verschiedenen Flüssigkeiten, deren Namen vertikal darüber stehen, aber für dieselbe Kugel.

Dreimal wiederholt sich dies für die Kugeln von den 3 verschiedenen Durchmessern, die mit A, a, α bezeichnet sind, so dass also für diese 3 Rubriken, welche die Ueberschriften: „die grössten, die mittleren und kleinsten Kugeln“ führen, Alles ausser dem Durchmesser der Kugeln eben, dasselbe bleibt.

Die erste Rubrik rechts für die Röhre II und die Kugeln A—E ist nur, um die Uebersicht nicht zu stören, auch in das Schema mit aufgenommen worden, obwohl hier keine Resultate möglich sind, da ja der Durchmesser der Röhre kleiner ist als der Durchmesser der Kugeln.

In der mittleren Rubrik fehlen die Resultate bei der mittleren Steinkugel, da dieselbe, wie schon oben angegeben, bei einem Versuche mit Salpetersäure verunglückte und nicht wieder ersetzt wurde.

Wir fügen, um den Gebrauch der Tabelle zu erleichtern, ein Beispiel bei: Die grösste Bleikugel A genannt, von dem Durchmesser 18^{mm}., gebraucht bei ihrem Laufe durch die Röhre I von 1556,6^{mm}. Länge und 25,5^{mm}. Weite in der Zuckerlösung 52 halbe Secunden, die mittlere Bleikugel von 12^{mm}. Durchmesser, a genannt, in derselben Flüssigkeit 21 halbe Secunden, die kleinste von dem Durchmesser 9,5^{mm}. 21,5 halbe Sec.

Vergleicht man also in diesen Tabellen zwei horizontal nebeneinander stehende Zahlen derselben Abtheilung, so ergiebt sich aus ihnen der Einfluss der verschiedenen Flüssigkeit auf die Zeitdauer des Laufs der Kugel; denn alle anderen das Resultat bedingenden Faktoren sind dieselben; vergleicht man zwei vertikal untereinander stehende Zahlen derselben Abtheilung, so kann hier die Verschiedenheit der Zahlen hauptsächlich nur durch das verschiedene spec. Gewicht der sonst gleichen Kugeln, die den Widerstand derselben Flüssigkeit überwinden, veranlasst sein. Die Verschiedenheit der Adhäsion für Blei, Zink u. s. w. übt wohl auch einen kleinen Einfluss, der aber verschwindend ist gegen den anderen.

Die Tab. XI enthält die Resultate, welche aus den Versuchen mit den Flüssigkeiten: Chlorzinklösung von 1,95 spec. Gew., Chlorzinklösung von 1,51 spec. Gew., Chloroform von 1,51 spec. Gew. und Chlorzinklösung von 1,2 spec. Gew. gewonnen wurden.

Die verschiedenen Grade der Neigung der Röhre sind hier gleich zusammengestellt worden, da die Versuche mit diesen Flüssigkeiten nicht so durchgeführt und so weit ausgedehnt worden sind, als die bisher mitgetheilten. Die sämmtlichen Versuche sind nur in der Röhre II angestellt worden; daher die Angabe über die verschiedenen Röhren hier nicht nöthig war. Von den Kugeln sind bei diesen Versuchen

nur die Blei- und Zinkkugel verwandt worden, da die Elfenbeinkugel von einem spec. Gew. 1,75 und die Hartgummikugel von einem spec. Gew. 1,25 bereits zum Theil specifisch leichter sind als die hier angewandten Chlorzinklösungen und das Chloroform.

Versuche, die specifisch leichteren Kugeln in der specifisch schwereren Flüssigkeit unter verschiedener Neigung aufsteigen zu lassen, statt wie in den mitgetheilten Versuchen sie abwärts rollen zu lassen, sind von uns noch nicht gemacht, aber ins Auge gefasst worden.

Die sonstige Anordnung der Tab. XI ist dieselbe wie bei den früheren Tabellen von I – X.

Die Tabellen XII—XVI enthalten keine neuen Zahlen, sondern geben dieselben nur in einer andern Zusammenstellung, um den Einfluss des Durchmessers der Röhre zu zeigen. Die Ueberschrift enthält den Namen der Flüssigkeit, in welcher die sämmtlichen, auf der Seite stehenden Versuchsreihen stattgefunden haben; sodann folgen die Grade der Neigung der Röhre von $5^0 - 90^0$, so dass also vertikal untereinander die Zahlen für denselben Grad stehen. Es folgen nun stets je zwei horizontale Reihen, in denen für ein und dieselbe Kugel, z. B. a Bleikugel und dieselbe Flüssigkeit natürlich, aber in der ersten Reihe für die Röhre II, in der zweiten für die Röhre I die Zahlen nebeneinander stehen, sodass also der Unterschied zwischen je zwei untereinanderstehenden Zahlen z. B. $\frac{70,^0}{21,^0}\ \frac{41,^0}{14,^0}$ nur durch die Verschiedenheit des Durchmessers der Röhren hervorgerufen sein kann; denn alle anderen, das Resultat bedingenden Faktoren sind genau ein und dieselben. Je vier horizontale Reihen enthalten die Zahlen der Versuchsreihen mit Kugeln aus demselben Stoff, z. B. Blei, die ersten zwei die mit der mittleren Kugel a, die letzten zwei die mit der kleinsten Kugel α.

Die Versuchsreihen mit den grössten Kugeln konnten hier nicht verwandt werden, da der Durchmesser derselben das Rollen in der Röhre II nicht mehr zulässt.

Auf die ersten vier Reihen mit den Bleikugeln folgen vier andere mit den Zinkkugeln, sodann Elfenbein- und Hartgummikugeln, so dass jedes Blatt 16 Versuchsreihen enthält. Die Versuchsreihen mit der Steinkugel sind weggelassen, da aus dem oben angegebenen Grunde einige Reihen für dieselbe fehlten.

Die Tabelle XVII enthält die Quotienten aus je zwei untereinander stehenden Zahlen, die für dieselbe Kugel und dieselbe Flüssigkeit, nur in verschiedenen Röhren die Zeit des Laufs angeben, so dass also der Quotient sagt, wie vielmal mehr Zeit die Kugel in der engeren Röhre braucht als in der weiteren. Die Berechnung ist für

jeden Grad gemacht worden, ausgenommen die von 80° und 90°, da aus den früher angeführten Gründen diese Zahlen nicht zuverlässig genug sind. Es ist sodann aus den 8 Werthen, die je 2 Reihen liefern, das Mittel genommen und hier bemerkt.

Die letzte Tafel XVIII zeigt eine graphische Darstellung des Laufes zweier verschiedenen Kugeln in 2 verschiedenen Flüssigkeiten.

Als Abscisse ist die Röhrenneigung von 5°, 10°, 20° u. s. w. bis 70° genommen (nicht bis 90°, da, wie oben angegeben, hier die Resultate weniger zuverlässig sind), als Ordinate die Zeit, welche die betreffende Kugel braucht, um den Weg in der geneigten Röhre zurückzulegen.

Die oberste Curve giebt den Lauf der Steinkugel C vom grössten Durchmesser in der Zuckerlösung durch die Röhre I, die darauf folgende zweite den derselben Kugel in derselben Röhre, aber in Alkohol, die dritte Curve den der Bleikugel A vom grössten Durchmesser in Zuckerlösung, die vierte den derselben Kugel in derselben Röhre I, aber wiederum, wie bei der zweiten in Alkohol.

Nach diesem Muster lassen sich leicht die Wege für die verschiedenen Kugeln in den verschiedenen Flüssigkeiten zeichnen.

5°

Röhre I.

Röhre II.

Die grössten Kugeln A, B, C, D, E,

in

	Zuckerlösung.	Salzlösung.	Wasser.	Alkohol.	Petroleumäther.
A. Bleikugel .	52,0	39,0	31,0	28,0	23,0
B. Zinkkugel .	81,0	54,5	44,0	38,5	32,0
C. Steinkugel .	234,0	127,0	85,0	79,0	56,0
D. Elfenbnkgl.	—	266,0	150,0	124,0	† 86,0
E. Gummikgl.	—	—	282,0	—	121,0

	Zuckerlösung.	Salzlösung.	Wasser.	Alkohol.	Petroleumäther.
A. Bleikugel .	—	—	—	—	—
B. Zinkkugel .	—	—	—	—	—
C. Steinkugel .	—	—	—	—	—
D. Elfenbnkgl.	—	—	—	—	—
E. Gummikgl.	—	—	—	—	—

Die mittleren Kugeln a, b, c, d, e,

in denselben Röhren, wie in denselben Flüssigkeiten.

a. Bleikugel. .	21,0	17,0	15,0	12,5	10,5
b. Zinkkugel .	30,0	22,0	19,5	17,0	15,0
c. Steinkugel .	—	—	—	—	—
d. Elfenbnkgl.	200,0	90,0	57,0	46,0	36,0
e. Gummikgl. .	—	521,0	109,0	75,0	51,0

a. Bleikugel. .	70,0	42,0	35,0	33,0	27,0
b. Zinkkugel .	105,0	57,0	47,5	43,5	35,0
c. Steinkugel .	396,0	146,5	100,0	93,0	67,0
d. Elfenbnkgl.	—	322,0	184,0	154,0	101,0
e. Gummikgl. .	—	—	349,0	248,0	142,0

Die kleinsten Kugeln α, β, γ, δ, ε,

in denselben Röhren und denselben Flüssigkeiten.

α. Bleikugel. .	21,5	17,0	13,0	12,0	10,0
β. Zinkkugel .	30,0	22,0	19,5	17,5	14,0
γ. Steinkugel .	93,5	48,0	35,5	31,0	26,5
δ. Elfenbnkgl .	229,0	90,0	55,0	46,0	36,0
ε. Gummikgl. .	—	524,0	108,0	76,0	48,0

α. Bleikugel. .	32,0	22,0	19,5	18,0	16,0
β. Zinkkugel .	44,0	29,0	24,0	22,0	21,0
γ. Steinkugel .	140,0	67,0	51,0	44,0	36,0
δ. Elfenbnkgl.	394,0	135,0	85,0	69,5	48,0
ε. Gummikgl. .	—	—	160,5	107,0	68,0

10°

Röhre I.

Die grössten Kugeln A, B, C, D, E,

in

	Zuckerlösung.	Salzlösung.	Wasser.	Alkohol.	Petroleumäther.
A. Bleikugel .	31,5	25,0	21,0	19,0	16,0
B. Zinkkugel .	47,5	35,0	30,0	27,0	22,5
C. Steinkugel .	127,5	75,5	58,0	50,5	39,0
D. Elfenbnkgl.	325,0	148,0	94,0	78,0	† 56,0
E. Gummikgl..	—	—	172,0	117,0	78,0

Die mittleren Kugeln a, b, c, d, e,

in denselben Röhren, wie in denselben Flüssigkeiten.

a. Bleikugel ..	14,0	10,5	9,0	8,0	7,0
b. Zinkkugel .	19,0	16,0	14,0	11,0	9,0
c. Steinkugel .	—	—	—	—	—
d. Elfenbnkgl.	102,0	55,0	38,0	31,5	27,0
e. Gummikgl..	943,0	271,0	68,0	47,0	35,0

Die kleinsten Kugeln α, β, γ, δ, ε,

in denselben Röhren, wie in denselben Flüssigkeiten.

α. Bleikugel ..	14,0	10,0	8,0	8,0	6,0
β. Zinkkugel .	18,0	16,0	11,0	10,0	8,0
γ. Steinkugel .	52,0	32,0	26,0	23,0	20,0
δ. Elfenbnkgl.	115,0	52,0	37,5	31,0	28,0
ε. Gummikgl..	984,0	267,0	67,0	46,0	35,0

Röhre II.

Die grössten Kugeln A, B, C, D, E,

in

	Zuckerlösung.	Salzlösung.	Wasser.	Alkohol.	Petroleumäther.
A. Bleikugel ..	—	—	—	—	—
B. Zinkkugel .	—	—	—	—	—
C. Steinkugel .	—	—	—	—	—
D. Elfenbnkgl.	—	—	—	—	—
E. Gummikgl..	—	—	—	—	—

Die mittleren Kugeln a, b, c, d, e,

in denselben Röhren, wie in denselben Flüssigkeiten.

a. Bleikugel ..	41,0	27,5	24,0	22,0	18,5
b. Zinkkugel .	59,0	37,0	32,5	28,5	25,0
c. Steinkugel .	193,0	90,0	65,0	59,0	44,5
d. Elfenbnkgl.	525,0	180,5	110,5	94,0	65,0
e. Gummikgl. .	5280,0	1217,0	208,0	145,0	91,0

Die kleinsten Kugeln α, β, γ, δ, ε,

in denselben Röhren, wie in denselben Flüssigkeiten.

α. Bleikugel ..	19,0	15,5	12,0	11.0	10,0
β. Zinkkugel .	26,0	21,0	18,0	16,0	15,0
γ. Steinkugel .	76,0	43,5	34,0	30,0	26,0
δ. Elfenbnkgl.	173,5	80,0	54,0	44,0	35,0
ε. Gummikgl..	1416,0	432,0	99,0	66,0	46,0

20°

Röhre I.

Röhre II.

Die grössten Kugeln A, B, C, D, E,

in

	Zuckerlösung	Salzlösung.	Wasser.	Alkohol.	Petroleumäther.
A. Bleikugel . .	21,0	17,0	14,0	13,0	11,0
B. Zinkkugel .	30,0	24,0	22,0	18,0	15,0
C. Steinkugel .	74,5	51,0	42,0	35,0	† 31,0
D. Elfenbnkgl.	173,5	93,0	63,0	51,0	† 41,0
E. Gummikgl. .	—	—	110,0	77,0	53,5

	Zuckerlösung.	Salzlösung.	Wasser.	Alkohol.	Petroleumäther.
A. Bleikugel . .	—	—	—	—	—
B. Zinkkugel .	—	—	—	—	—
C. Steinkugel .	—	—	—	—	—
D. Elfenbnkgl.	—	—	—	—	—
E. Gummikgl. .	—	—	—	—	—

Die mittleren Kugeln a, b, c, d, e,

in denselben Röhren, wie in denselben Flüssigkeiten.

a. Bleikugel . .	8,0	7,0	6,0	5,0	4,0
b. Zinkkugel .	12,0	9,5	8,0	7,0	6,0
c. Steinkugel .	—	—	—	—	—
d. Elfenbnkgl.	58,0	38,5	† 31,0	24,0	† 21,0
e. Gummikgl. .	450,0	161,0	50,0	34,0	† 29,0

a. Bleikugel . .	25,0	18,0	15,5	14,0	12,0
b. Zinkkugel .	35,0	25,5	24,0	19,0	17,0
c. Steinkugel .	103,5	57,5	46,0	38,0	34,0
d. Elfenbnkgl.	261,0	111,0	73,5	59,0	44,0
e. Gummikgl. .	2325,0	665,0	134,0	88,0	62,0

Die kleinsten Kugeln α, β, γ, δ, ε,

in denselben Röhren, wie in denselben Flüssigkeiten.

α. Bleikugel . .	8,0	7,0	6,0	5,0	4,0
β. Zinkkugel .	12,0	9,0	7,0	7,0	5,0
γ. Steinkugel .	30,0	23,0	19,0	15,0	10,5
δ. Elfenbnkgl.	63,0	37,0	29,0	23,0	21,0
ε. Gummikgl. .	462,0	155,0	49,0	33,0	† 28,0

α. Bleikugel . .	12,0	10,0	8,0	7,0	7,0
β. Zinkkugel .	16,0	14,0	10,0	9,0	8,0
γ. Steinkugel .	44,0	30,5	27,0	22,0	20,0
δ. Elfenbnkgl.	91,0	52,0	38,0	31,0	27,0
ε. Gummikgl. .	677,0	240,0	65,0	43,0	37,0

30°

Röhre I.

Die grössten Kugeln A, B, C, D, E,

in

	Zuckerlösung.	Salzlösung.	Wasser.	Alkohol.	Petroleumäther.
A. Bleikugel . .	16,0	14,0	12,0	10,0	9,0
B. Zinkkugel .	23,0	19,0	17,0	15,0	12,0
C. Steinkugel .	56,0	41,0	36,5	31,0	† 25,0
D. Elfenbnkgl.	125,0	73,0	52,0	43,0	† 36,0
E. Gummikgl. .	—	—	89,0	60,0	† 49,0

Die mittleren Kugeln a, b, c, d, e,

in denselben Röhren, wie in denselben Flüssigkeiten.

a. Bleikugel . .	6,5	6,0	5,0	4,0	3,0
b. Zinkkugel .	9,0	7,5	6,0	5,5	4,5
c. Steinkugel .	—	—	—	—	—
d. Elfenbnkgl.	44,0	33,0	† 27,0	† 21,0	† 17,0
e. Gummikgl. .	294,0	120,0	† 44,0	30,0	† 24,0

Die kleinsten Kugeln α, β, γ, δ, ε,

in denselben Röhren, wie in denselben Flüssigkeiten.

α. Bleikugel . .	6,0	5,5	5,0	4,0	3,0
β. Zinkkugel .	9,0	7,0	6,0	5,0	4,0
γ. Steinkugel .	23,0	19,0	12,5	10,0	8,0
δ. Elfenbnkgl.	44,5	32,0	24,0	† 18,0	14,0
ε. Gummikgl. .	300,0	115,5	42,0	28,0	† 22,5

Röhre II.

	Zuckerlösung.	Salzlösung.	Wasser.	Alkohol.	Petroleumäther.
A. Bleikugel . .	—	—	—	—	—
B. Zinkkugel .	—	—	—	—	—
C. Steinkugel .	—	—	—	—	—
D. Elfenbnkgl.	—	—	—	—	—
E. Gummikgl. .	—	—	—	—	—

a. Bleikugel . .	19,0	15,0	12,5	11,0	10,0
b. Zinkkugel .	27,0	20,0	18,0	15,0	13,0
c. Steinkugel .	73,0	46,0	38,5	32,0	28,0
d. Elfenbnkgl.	179,0	86,0	59,0	47,0	40,0
e. Gummikgl. .	1503,0	464,0	106,0	70,0	54,5

α. Bleikugel . .	9,5	7,0	6,5	6,0	5,0
β. Zinkkugel .	12,0	10,0	8,0	8,0	7,0
γ. Steinkugel .	32,0	26,0	23,0	18,0	15,0
δ. Elfenbnkgl.	64,0	43,0	33,5	26,0	22,0
ε. Gummikgl. .	444,0	180,0	57,0	36,0	33,0

Tab. V.

40°

Röhre I.

Die grössten Kugeln A, B, C, D, E,

in

	Zuckerlösung.	Salzlösung.	Wasser.	Alkohol.	Petroleumäther.
A. Bleikugel . .	14,0	12,0	10,0	9,0	7,0
B. Zinkkugel .	20,0	16,0	14,0	13,0	10,0
C. Steinkugel .	47,0	38,0	33,5	27,0	† 21,0
D. Elfenbnkgl.	101,0	63,5	† 49,5	† 39,0	† 30,0
E. Gummikgl. .	—	—	80,0	55,0	† 44,0

Die mittleren Kugeln a, b, c, d, e,

in denselben Röhren, wie in denselben Flüssigkeiten.

a. Bleikugel . .	5,0	5,0	4,0	4,0	3,0
b. Zinkkugel .	8,0	6,0	5,0	5,0	4,0
c. Steinkugel .	—	—	—	—	—
d. Elfenbnkgl.	36,0	30,5	† 23,0	† 18,0	† 14,0
e. Gummikgl. .	216,0	99,0	† 46,0	† 26,5	† 21,0

Die kleinsten Kugeln α, β, γ, δ, ε,

in denselben Röhren, wie in denselben Flüssigkeiten.

α. Bleikugel . .	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0
β. Zinkkugel .	8,0	6,0	5,0	4,0	3,5
γ. Steinkugel .	19,0	13,0	10,0	9,0	7,0
δ. Elfenbnkgl.	36,0	† 27,0	† 19,0	13,0	11,0
ε. Gummikgl. .	216,0	96,0	† 36,0	24,0	17,0

Röhre II.

	Zuckerlösung.	Salzlösung.	Wasser.	Alkohol.	Petroleumäther.
A. Bleikugel . .	—	—	—	—	—
B. Zinkkugel .	—	—	—	—	—
C. Steinkugel .	—	—	—	—	—
D. Elfenbnkgl.	—	—	—	—	—
E. Gummikgl. .	—	—	—	—	—

a. Bleikugel . .	16,0	13,0	11,0	9,5	9,0
b. Zinkkugel .	23,0	17,0	14,5	13,0	11,0
c. Steinkugel .	60,0	39,0	† 35,0	28,0	23,0
d. Elfenbnkgl.	143,0	72,5	51,0	42,0	36,0
e. Gummikgl. .	1153,0	371,0	90,0	60,0	51,0

α. Bleikugel . .	8,0	6,0	5,0	5,0	4,0
β. Zinkkugel .	10,5	9,0	7,0	6,0	6,0
γ. Steinkugel .	26,0	23,0	† 18,0	14,0	11,0
δ. Elfenbnkgl.	52,0	38,5	† 30,0	23,0	18,0
ε. Gummikgl. .	335,0	148,0	† 51,0	34,0	28,0

Tab. VI.

50°

Röhre I.

Die grössten Kugeln A, B, C, D, E,

in

	Zuckerlösung.	Salzlösung.	Wasser.	Alkohol.	Petroleumäther.
A. Bleikugel . .	13,0	11,0	9,0	8,0	6,5
B. Zinkkugel .	18,0	15,0	13,0	11,0	9,0
C. Steinkugel .	42,0	35,0	† 28,0	† 23,0	† 17,0
D. Elfenbnkgl.	88,0	58,0	† 47,0	36,0	† 25,0
E. Gummikgl. .	—	—	† 75,0	† 50,0	37,0

Die mittleren Kugeln a, b, c, d, e,

in denselben Röhren, wie in denselben Flüssigkeiten.

a. Bleikugel . .	4,0	4,0	3,5	3,0	3,0
b. Zinkkugel . .	7,0	6,0	5,0	4,0	3,0
c. Steinkugel .	—	—	—	—	—
d. Elfenbnkgl.	30,0	27,0	† 21,0	† 14,0	10,0
e. Gummikgl. .	168,0	82,5	† 37,0	† 24,0	† 17,0

Die kleinsten Kugeln α, β, γ, δ, ε,

in denselben Röhren, wie in denselben Flüssigkeiten.

α. Bleikugel . .	4,0	4,0	3,0	3,0	2,5
β. Zinkkugel .	6,0	5,0	4,5	4,0	3,0
γ. Steinkugel .	16,0	12,0	9,0	8,0	6,0
δ. Elfenbnkgl.	30,0	24,0	15,0	12,0	10,0
ε. Gummikgl. .	166,5	81,0	† 32,0	20,0	14,0

Röhre II.

	Zuckerlösung.	Salzlösung.	Wasser.	Alkohol.	Petroleumäther.
A. Bleikugel . .	—	—	—	—	—
B. Zinkkugel .	—	—	—	—	—
C. Steinkugel .	—	—	—	—	—
D. Elfenbnkgl.	—	—	—	—	—
E. Gummikgl. .	—	—	—	—	—

a. Bleikugel . .	15,0	12,0	10,0	9,0	8,0
b. Zinkkugel .	21,0	15,0	13,0	12,0	10,0
c. Steinkugel .	53,0	35,0	† 31,0	23,0	20,0
d. Elfenbnkgl.	121,0	64,0	48,0	38,0	30,0
e. Gummikgl. .	1026,0	320,0	83,0	54,0	45,0

α. Bleikugel . .	7,0	6,0	5,0	5,0	4,0
β. Zinkkugel .	10,0	8,0	6,0	6,0	5,0
γ. Steinkugel .	24,0	21,0	† 15,0	11,0	10,0
δ. Elfenbnkgl.	45,0	36,0	† 27,0	20,0	14,0
ε. Gummikgl. .	265,0	132,0	† 48,0	30,5	23,0

Tab. VII.

60°

Röhre I.

Röhre II.

Die grössten Kugeln A, B, C, D, E,

in

	Zuckerlösung.	Salzlösung.	Wasser.	Alkohol.	Petroleumäther.
A. Bleikugel..	12,0	10,0	8,5	7,5	6,0
B. Zinkkugel .	16,5	14,0	12,0	10,0	8,0
C. Steinkugel .	37,5	30,0	† 24,0	20,0	16,0
D. Elfenbnkgl.	79,0	54,0	41,0	32,0	—
E. Gummikgl..	—	—	† 70,0	† 47,0	—

	Zuckerlösung.	Salzlösung.	Wasser.	Alkohol.	Petroleumäther.
A. Bleikugel..	—	—	—	—	—
B. Zinkkugel .	—	—	—	—	—
C. Steinkugel .	—	—	—	—	—
D. Elfenbnkgl.	—	—	—	—	-
E. Gummikgl..	—	—	—	—	—

Die mittleren Kugeln a, b, c, d, e,

in denselben Röhren, wie in denselben Flüssigkeiten.

a. Bleikugel ..	4,0	4,0	3,0	3,0	2,0
b. Zinkkugel .	6,0	5,0	4,0	3,5	3,0
c. Steinkugel .	—	—	—	—	—
d. Elfenbnkgl.	23,0	25,0	† 17,0	12,0	9,0
e. Gummikgl..	132,0	64,0	† 33,5	† 22,0	14,0

a. Bleikugel ..	14,0	11,0	9,0	8,0	7,0
b. Zinkkugel .	19,0	14,0	13,0	11,0	10,0
c. Steinkugel .	48,0	† 32,5	26,0	22,0	18,0
d. Elfenbnkgl.	107,0	59,0	† 45,5	34,0	26,0
e. Gummikgl..	879,0	286,0	76,0	51,0	39,0

Die kleinsten Kugeln α, β, γ, δ, ε,

in denselben Röhren, wie in denselben Flüssigkeiten.

α. Bleikugel ..	3,5	3,0	3,0	3,0	2,0
β. Zinkkugel .	5,5	5,0	4,0	3,0	3,0
γ. Steinkugel .	13,0	11,0	8,0	7,0	6,0
δ. Elfenbnkgl.	23,0	20,0	13,0	11,0	9,0
ε. Gummikgl..	131,0	60,0	29,0	16,0	13,0

α. Bleikugel ..	6,0	5,0	5,0	4,0	3,0
β. Zinkkugel .	8,0	7,0	6,0	5,0	4,0
γ. Steinkugel .	20,0	16,0	13,0	11,0	8,5
δ. Elfenbnkgl.	38,0	† 33,0	23,0	16,0	13,0
ε. Gummikgl..	196,0	118,0	44,0	28,0	19,0

Tab. VIII.

70°

Röhre I.

	Zuckerlösung.	Salzlösung.	Wasser.	Alkohol.	Petroleumäther.
A. Bleikugel .	10,0	9,5	8,0	7,0	6,0
B. Zinkkugel .	15,0	13,0	11,0	9,5	8,0
C. Steinkugel .	33,0	28,0	22,0	19,0	15,0
D. Elfenbnkgl.	67,0	51,0	36,0	28,0	—
E. Gummikgl.	—	—	64,0	43,0	—

Röhre II.

	Zuckerlösung.	Salzlösung.	Wasser.	Alkohol.	Petroleumäther.
A. Bleikugel .	—	—	—	—	—
B. Zinkkugel .	—	—	—	—	—
C. Steinkugel .	—	—	—	—	—
D. Elfenbnkgl.	—	—	—	—	—
E. Gummikgl.	—	—	—	—	—

Die grössten Kugeln A, B, C, D, E,

in

Die mittleren Kugeln a, b, c, d, e,

in denselben Röhren, wie in denselben Flüssigkeiten.

a. Bleikugel. .	3,0	3,0	3,0	2,5	2,0
b. Zinkkugel .	4,5	4,5	4,0	3,0	3,0
c. Steinkugel .	—	—	—	—	—
d. Elfenbnkgl.	20,0	16,0	17,0	11,0	† 8,0
e. Gummikgl. .	100,0	60,0	† 29,0	14,0	13,0

a. Bleikugel. .	12,0	10,0	9,0	8,0	6,0
b. Zinkkugel .	16,0	13,0	12,0	10,0	9,0
c. Steinkugel .	40,0	30,0	24,0	20,5	16,0
d. Elfenbnkgl.	91,0	55,0	40,0	32,0	—
e. Gummikgl. .	726,0	247,0	71,0	47,0	—

Die kleinsten Kugeln α, β, γ, δ, ε,

in denselben Röhren, wie in denselben Flüssigkeiten.

α. Bleikugel. .	3,0	3,0	3,0	2,5	2,0
β. Zinkkugel .	4,0	4,0	4,0	3,0	—
γ. Steinkugel .	10,0	9,0	8,0	7,0	6,0
δ. Elfenbnkgl .	17,0	14,0	12,0	10,0	8,0
ε. Gummikgl. .	108,0	52,0	24,0	13,0	12,0

α. Bleikugel. .	5,0	4,0	4,0	4,0	3,0
β. Zinkkugel .	6,0	6,0	6,0	4,0	4,0
γ. Steinkugel .	15,0	14,0	12,0	10,0	8,0
δ. Elfenbnkgl.	28,0	† 30,0	19,0	14,0	12,0
ε. Gummikgl. .	176,0	84,0	40,0	26,0	18,0

80°

Röhre I.

	Zuckerlösung.	Salzlösung.	Wasser.	Alkohol.	Petroleumäther.
A. Bleikugel .	10,0	9,0	7,0	6,5	5,5
B. Zinkkugel .	14,0	12,0	10,0	9,0	8,0
C. Steinkugel .	—	—	—	—	—
D. Elfenbnkgl.	73,0	† 50,0	—	—	—
E. Gummikgl. .	—	—	—	—	—

Röhre II.

	Zuckerlösung.	Salzlösung.	Wasser.	Alkohol.	Petroleumäther.
A. Bleikugel . .	—	—	—	—	—
B. Zinkkugel .	—	—	—	—	—
C. Steinkugel .	—	—	—	—	—
D. Elfenbnkgl.	—	—	—	—	—
E. Gummikgl. .	—	—	—	—	—

Die grössten Kugeln A, B, C, D, E,

in

Die mittleren Kugeln a, b, c, d, e,

in denselben Röhren, wie in denselben Flüssigkeiten.

a. Bleikugel . .	3,0	3,0	2,0	2,0	2,0
b. Zinkkugel .	4,0	4,0	3,5	3,0	3,0
c. Steinkugel .	—	—	—	—	—
d. Elfenbnkgl.	18,0	15,0	15,0	10,0	—
e. Gummikgl. .	95,0	54,0	23,0	13,0	—

a. Bleikugel . .	10,0	9,0	8,0	7,0	5,5
b. Zinkkugel .	16,0	—	11,0	9,0	8,0
c. Steinkugel .	42,0	—	† 38,0	18,0	—
d. Elfenbnkgl.	97,0	56,5	† 53,0	—	—
e. Gummikgl. .	692,0	255,0	72,0	—	—

Die kleinsten Kugeln α, β, γ, δ, ε,

in denselben Röhren, wie in denselben Flüssigkeiten.

α. Bleikugel . .	3,0	3,0	2,0	2,0	2,0
β. Zinkkugel .	3,5	3,0	3,0	3,0	3,0
γ. Steinkugel .	9,0	8,0	8,0	7,0	5,5
δ. Elfenbnkgl.	16,0	13,0	10,0	9,0	8,0
ε. Gummikgl. .	79,0	48,0	17,0	12,0	12,0

α. Bleikugel . .	4,0	4,0	4,0	3,0	—
β. Zinkkugel .	6,0	5,0	5,0	—	—
γ. Steinkugel .	14,0	12,0	† 12,0	8,0	8,0
δ. Elfenbnkgl.	27,0	21,0	18,0	12,0	—
ε. Gummikgl. .	150,0	80,0	33,0	20,0	—

Tab. X.

90°

Röhre I.

Die grössten Kugeln A, B, C, D, E,

in

	Zuckerlösung.	Salzlösung.	Wasser.	Alkohol.	Petroleumäther.
A. Bleikugel . .	9,0	8,5	7,0	6,0	5,0
B. Zinkkugel .	13,0	11,0	10,0	8,0	7,0
C. Steinkugel .	32,0	—	—	—	—
D. Elfenbnkgl.	73,0	63,0	—	—	—
E. Gummikgl. .	—	—	—	—	—

Die mittleren Kugeln a, b, c, d, e,

in denselben Röhren, wie in denselben Flüssigkeiten.

a. Bleikugel . .	3,0	3,0	2,0	2,0	2,0
b. Zinkkugel .	4,0	4,0	3,0	3,0	3,0
c. Steinkugel .	—	—	—	—	—
d. Elfenbnkgl.	18,0	14,0	—	—	—
e. Gummikgl. .	94,0	52,0	17,0	13,0	—

Die kleinsten Kugeln α, β, γ, δ, ε,

in denselben Röhren, wie in denselben Flüssigkeiten.

α. Bleikugel . .	3,0	3,0	2,0	2,0	2,0
β. Zinkkugel .	3,0	3,0	3,0	2,0	—
γ. Steinkugel .	9,0	8,0	—	5,0	5,0
δ. Elfenbnkgl.	15,0	12,0	9,0	7,0	8,0
ε. Gummikgl. .	74,0	45,0	16,0	11,0	11,0

Röhre II.

Die grössten Kugeln A, B, C, D, E,

in

	Zuckerlösung.	Salzlösung.	Wasser.	Alkohol.	Petroleumäther.
A. Bleikugel . .	—	—	—	—	—
B. Zinkkugel .	—	—	—	—	—
C. Steinkugel .	—	—	—	—	—
D. Elfenbnkgl.	—	—	—	—	—
E. Gummikgl. .	—	—	—	—	—

Die mittleren Kugeln a, b, c, d, e,

in denselben Röhren, wie in denselben Flüssigkeiten.

a. Bleikugel . .	10,0	8,0	8,0	7,0	4,0
b. Zinkkugel .	16,0	—	10,0	9,0	8,0
c. Steinkugel .	40,0	—	† 38,0	—	—
d. Elfenbnkgl.	106,0	—	† 56,0	—	—
e. Gummikgl. .	1030,0	259,0	† 83,0	—	—

Die kleinsten Kugeln α, β, γ, δ, ε,

in denselben Röhren, wie in denselben Flüssigkeiten.

α. Bleikugel . .	4,0	4,0	3,0	—	—
β. Zinkkugel .	6,0	5,0	4,0	—	—
γ. Steinkugel .	14,0	11,0	—	8,0	—
δ. Elfenbnkgl.	26,0	19,0	18,0	10,0	—
ε. Gummikgl. .	150,0	80,0	33,0	18,0	—

	5°				10°				20°				30°				40°			
	Chlorzink. 1,95.	Chlorzink. 1,51.	Chloroform. 1,51.	Chlorzink. 1,2.	Chlorzink. 1,95.	Chlorzink. 1,51.	Chloroform. 1,51.	Chlorzink. 1,2.	Chlorzink. 1,95.	Chlorzink. 1,51.	Chloroform. 1,51.	Chlorzink. 1,2.	Chlorzink. 1,95.	Chlorzink. 1,51.	Chloroform. 1,51.	Chlorzink. 1,2	Chlorzink. 1,95.	Chlorzink. 1,51.	Chloroform. 1,51.	Chlorzink. 1,2.
a. Bleikugel . .	232,0	50,0	†39,0	39,0	111,0	32,5	†29,0	26,0	58,5	22,0	†20,0	17,0	41,5	17,0	†15,0	14,0	33,5	14,0	12,5	12,0
b. Zinkkugel .	401,0	72,0	52,5	51,5	190,0	45,5	†39,0	†35,0	97,0	30,0	†30,0	†25,0	68,5	24,0	†23,0	20,0	53,0	20,5	†19,0	16,0
α. Bleikugel . .	102,0	25,5	22,0	20,0	52,0	18,0	16,0	15,0	28,0	11,0	9,0	8,0	21,0	8,0	7,0	7,0	17,0	7,0	6,0	6,0
β. Zinkkugel .	188,0	36,0	28,0	27,0	89,0	23,0	†22,0	20,0	46,0	17,0	†15,5	13,0	32,5	12,0	11,0	9,0	25,0	10,0	8,0	8,0

	50°				60°				70°				80°				90°			
	Chlorzink. 1,95.	Chlorzink. 1,51.	Chloroform. 1,51.	Chlorzink. 1,2.	Chlorzink. 1,95.	Chlorzink. 1,51.	Chloroform. 1,51.	Chlorzink. 1,2.	Chlorzink. 1,95.	Chlorzink. 1,51.	Chloroform. 1,51.	Chlorzink. 1,2.	Chlorzink. 1,95.	Chlorzink. 1,51.	Chloroform. 1,51.	Chlorzink. 1,2	Chlorzink. 1,95.	Chlorzink. 1,51.	Chloroform. 1,51.	Chlorzink. 1,2.
a. Bleikugel . .	29,0	13,0	11,0	11,0	26,0	12,0	10,0	10,0	21,0	11,5	10,0	9,0	22,0	10,0	—	8,5	22,0	10,0	—	8,0
b. Zinkkugel .	46,0	18,0	16,0	14,0	40,0	17,0	15,0	13,5	34,0	16,0	14,0	13,0	36,0	15,0	—	12,0	36,0	14,0	—	10,5
α. Bleikugel . .	13,0	6,5	5,0	5,0	11,0	6,0	5,0	4,5	9,0	5,0	5,0	4,5	8,0	4,5	—	—	7,0	4,0	—	—
β. Zinkkugel .	19,0	9,0	7,5	7,0	15,5	8,0	7,0	6,5	12,5	7,0	7,0	6,0	12,0	6,0	—	5,0	11,0	6,0	—	5,0

Tab. XII.

Zuckerlösung.

	5°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
a. Bleikugel, Röhre II .	70,0	41,0	25,0	19,0	16,0	15,0	14,0	12,0	10,0	10,0
- — — I .	21,0	14,0	8,0	6,5	5,0	4,0	4,0	3,0	3,0	3,0
α. Bleikugel, R. II. . . .	32,0	19,0	12,0	9,5	8,0	7,0	6,0	5,0	4,0	4,0
- — - I. . . .	21,5	14,0	8,0	6,0	5,0	4,0	3,5	3,0	3,0	3,0
a. Zinkkugel, R. II . . .	105,0	59,0	35,0	27,0	23,0	21,0	19,0	16,0	16,0	16,0
- — - I . . .	30,0	19,0	12,0	9,0	8,0	7,0	6,8	4,5	4,0	4,0
α. Zinkkugel, R. II . . .	44,0	26,0	16,0	12,0	10,5	10,0	8,0	6,0	6,0	6,0
- — - I . . .	30,0	18,0	12,0	9,0	8,0	6,0	5,5	4,0	3,5	3,0
a. Elfenbeinkugel, R. II.	—	525,0	261,0	179,0	143,0	121,0	107,0	91,0	—	—
- — - I.	200,0	102,0	58,0	44,0	36,0	30,0	23,0	20,0	18,0	18,0
α. Elfenbeinkugel, R. II.	394,0	173,5	91,0	64,0	52,0	45,0	38,0	28,0	27,0	26,0
- — - I.	229,0	115,0	63,0	44,5	36,0	30,0	23,0	17,0	16,0	15,0
a. Hartgummikgl., R. II.	—	5280,0	2325,0	1503,0	1153,0	1026,0	879,0	726,0	692,0	—
- — - I.	—	943,0	450,0	294,0	216,0	168,0	132,0	100,0	95,0	94,0
α. Hartgummikgl., R. II.	—	1416,0	677,0	444,0	335,0	265,0	196,0	176,0	150,0	150,0
- — - I.	—	984,0	462,0	300,0	216,0	166,5	131,0	108,0	79,0	74,0

Tab. XIII.

Salzlösung.

	5°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
a. Bleikugel, R. II . . .	42,0	27,5	18,0	15,0	13,0	12,0	11,0	10,0	9,0	8,0
- — - I . . .	17,0	10,5	7,0	6,0	5,0	4,0	4,0	3,0	3,0	3,0
α. Bleikugel, R. II . . .	22,0	15,5	10,0	7,0	6,0	6,0	5,0	4,0	4,0	4,0
- — - I . . .	17,0	10,0	7,0	5,5	4,5	4,0	3,0	3,0	3,0	3,0
a. Zinkkugel, R. II . . .	57,0	37,0	25,5	20,0	17,0	15,0	14,0	13,0	—	—
- — - I . . .	22,0	16,0	9,5	7,5	6,0	6,0	5,0	4,5	4,0	4,0
α. Zinkkugel, R. II . . .	29,0	21,0	14,0	10,0	9,0	8,0	7,0	6,0	5,0	5,0
- — - I . . .	22,0	16,0	9,0	7,0	6,0	5,0	5,0	4,0	3,0	3,0
a. Elfenbeinkugel, R. II.	322,0	180,5	111,0	86,0	72,5	64,0	59,0	55,0	56,5	—
- — - I.	90,0	55,0	38,5	33,0	30,5	27,0	25,0	16,0	15,0	14,0
α. Elfenbeinkugel, R. II.	135,0	80,0	52,0	43,0	38,5	36,0	33,0	30,0	21,0	19,0
- — - I.	90,0	52,0	37,0	32,0	27,0	†24,0	20,0	14,0	13,0	12,0†
a. Hartgummikgl., R. II.	0	1217,0	665,0	464,0	371,0	320,0	286,0	247,0	255,0	259,0
- — - I.	521,0	271,0	161,0	120,0	99,0	82,5	64,0	60,0	54,0	52,0
α. Hartgummikgl., R. II.	0	432,0	240,0	180,0	148,0	132,0	118,0	84,0	80,0	80,0
- — - I.	524,0	267,0	155,0	115,0	96,0	81,0	60,0	52,0	48,0	45,0

Tab. XIV.

Wasser.

	5°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
a. Bleikugel, R. II . . .	35,0	24,0	15,5	12,5	11,0	10,0	9,0	9,0	8,0	8,0
- — - I . . .	15,0	9,0	6,0	5,0	4,0	3,5	3,0	3,0	2,0	2,0
α. Bleikugel, R. II . . .	19,5	12,0	8,0	6,5	5,0	5,0	5,0	4,0	4,0	3,0
- — - I . . .	13,0	8,0	6,0	5,0	4,0	3,0	3,0	3,0	2,0	2,0
a. Zinkkugel, R. II . . .	47,5	32,5	24,0	18,0	14,5	13,0	13,0	12,0	11,0	10,0
- — - I . . .	19,5	14,0	8,0	6,0	5,0	5,0	4,0	4,0	3,5	3,0
α. Zinkkugel, R. II . . .	24,0	18,0	10,0	8,0	7,0	6,0	6,0	6,0	5,0	4,0
- — - I . . .	19,5	11,0	7,0	6,0	5,0	4,5	4,0	4,0	3,0	3,0
a. Elfenbeinkugel, R. II.	184,0	110,5	73,5	59,0	51,0	48,0	45,5†	40,0	—	—
- — - I.	57,0	38,0	37,0†	27,0†	23,0†	21,0†	17,0†	17,0	—	0
α. Elfenbeinkugel, R. II.	85,0	54,0	38,0	33,5	30,0†	27,0†	23,0	19,0	18,0	18,0
- — - I.	55,0	37,5	29,0	24,0	19,0†	15,0	13,0	12,0	10,0	9,0
a. Hartgummikgl., R. II.	349,0	208,0	134,0	106,0	90,0	83,0	76,0	71,0	72,0	0
- — - I.	109,0	68,0	50,0	44,0†	40,0†	37,0†	33,5†	29,0†	23,0	17,0
α. Hartgummikgl., R. II.	160,5	99,0	65,0	57,0	51,0†	48,0†	44,0	40,0	33,0	33,0
- — - I.	108,0	67,0	49,0	42,0	36,0†	32,0†	29,0	24,0	17,0	16,0

Tab. XV.

Alkohol.

	5°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
a. Bleikugel, R. II . . .	33,0	22,0	15,5	12,5	11,0	10,0	9,0	9,0	8,0	8,0
- — - I . . .	12,5	8,0	5,0	4,0	4,0	3,0	3,0	2,5	2,0	2,0
α. Bleikugel, R. II . . .	18,0	11,0	7,0	6,0	5,0	5,0	4,0	4,0	3,0	—
- — - I . . .	12,0	8,0	5,0	4,0	3,5	3,0	3,0	2,5	2,0	2,0
a. Zinkkugel, R. II . . .	43,5	28,5	19,0	15,0	13,0	12,0	11,0	10,0	9,0	9,0
- — - I . . .	17,0	11,0	7,0	5,5	5,0	4,0	3,5	3,0	3,0	3,0
α. Zinkkugel, R. II . . .	22,0	16,0	9,0	8,0	6,0	6,0	5,0	4,0	—	—
- — - I . . .	17,5	10,0	7,0	5,0	4,0	4,0	3,0	3,0	3,0	2,0
a. Elfenbeinkugel, R. II.	154,0	94,0	59,0	47,0	42,0	38,0	34,0	32,0	—	—
- — - I.	46,0	31,5	24,0	21,0†	18,0†	14,0†	12,0	11,0	10,0	9,0
α. Elfenbeinkugel, R. II.	69,5	44,0	31,0	26,0	23,0	20,0	16,0	14,0	12,0	10,0
- — - I.	46,0	31,0	23,0	18,0†	13,0	12,0	11,0	10,0	9,0	7,0
a. Hartgummikgl., R. II.	248,0	145,0	88,0	70,0	60,0	54,0	51,0	47,0	—	—
- — - I.	75,0	47,0	34,0	30,0	26,5†	24,0†	22,0†	14,0	13,0	13,0
α. Hartgummikgl., R. II.	107,0	66,0	43,0	36,0	34,0	30,5	28,0	26,0	20,0	18,0
- — - I.	76,0	46,0	33,0	28,0	24,0	20,0	16,0	13,0	12,0	11,0

Tab. XVI.

Petroleumäther.

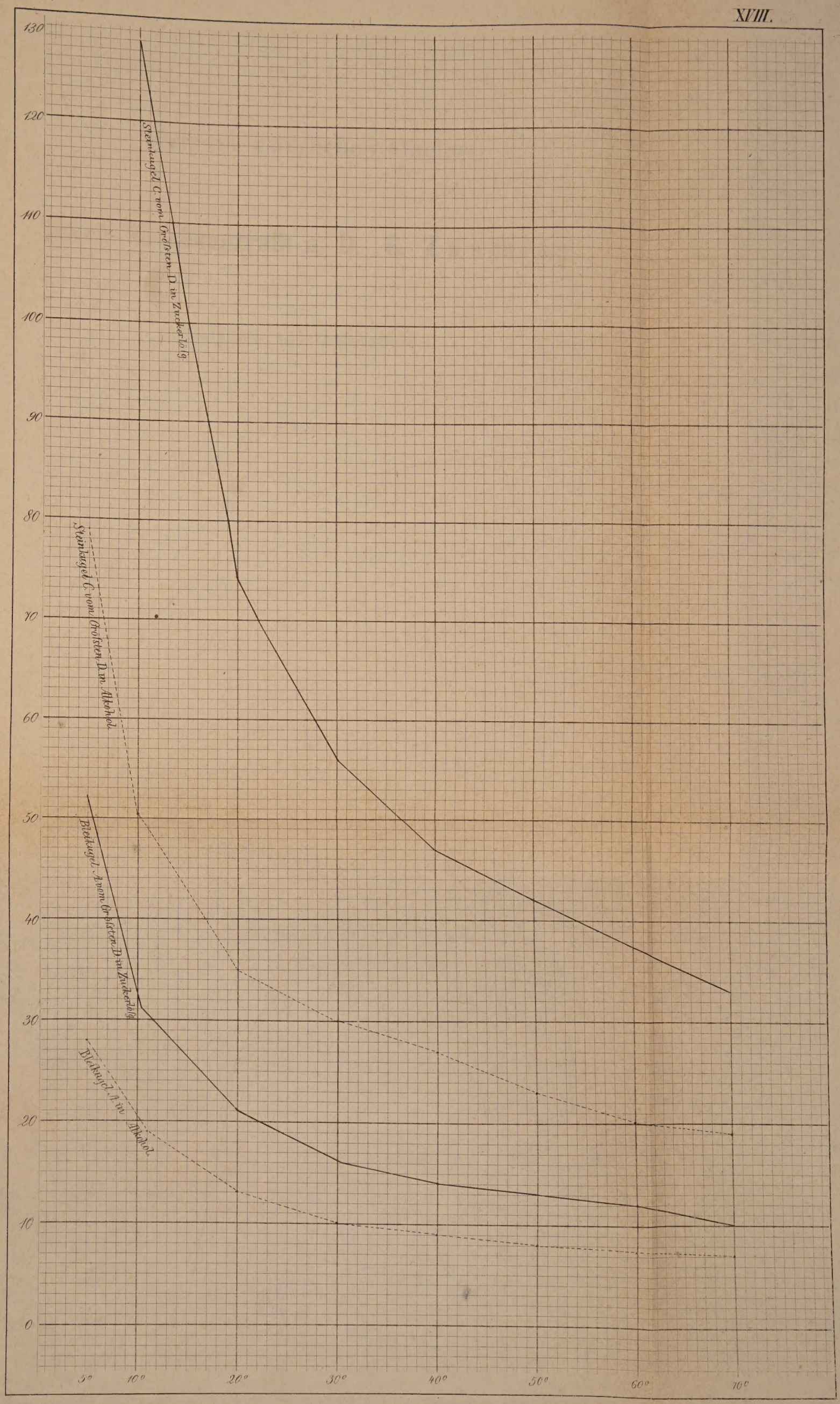
	5°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
a. Bleikugel, Röhre II .	27,0	18,5	12,0	10,0	9,0	8,0	7,0	6,0	5,5	4,0
- — — I .	10,5	7,0	4,0	3,0	3,0	3,0	2,0	2,0	2,0	2,0
α. Bleikugel, R. II. . . .	16,0	10,0	7,0	5,0	4,0	4,0	3,0	3,0	—	—
- — - I. . . .	10,0	6,0	4,0	3,0	3,0	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0
a. Zinkkugel, R. II . . .	35,0	25,0	17,0	13,0	11,0	10,0	10,0	9,0	8,0	8,0
- — - I . . .	15,0	9,0	6,0	4,5	4,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
α. Zinkkugel, R. II . . .	21,0	15,0	8,0	7,0	6,0	5,0	4,0	4,0	—	—
- — - I . . .	14,0	8,0	5,0	4,0	3,5	3,0	3,0	2,0	—	—
a. Elfenbeinkugel, R. II.	101,0	65,0	44,0	40,0	36,0	30,0	26,0	—	—	—
- — - I.	36,0	27,0	21,0†	17,0†	14,0†	10,0	9,0	8,0†	—	—
α. Elfenbeinkugel, R. II.	48,0	35,0	27,0	22,0	18,0	14,0	13,0	12,0	—	—
- — - I.	36,0	28,0	21,0	14,0	11,0	10,0	9,0	8,0	8,0	8,0
a. Hartgummikgl., R. II.	142,0	91,0	62,0	54,5	51,0	45,0	39,0	—	—	—
- — - I.	51,0	35,0	29,0†	24,0†	21,0†	17,0†	14,0	13,0	—	—
α. Hartgummikgl., R. II.	68,0	46,0	37,0	33,0	28,0	23,0	19,0	18,0	—	—
- — - I.	48,0	35,0	28,0†	22,5†	17,0	14,0	13,0	12,0	12,0	11,0

Tab. XVII.

Uebersicht.

	Zuckerlösung.	Salzlösung.	Wasser.	Alkohol.	Petroleumäther.
a. Bleikugel	3,2	2,7	2,6	3,0	3,0
α. —	1,5	1,4	1,4	1,4	1,5
a. Zinkkugel	3,1	2,6	2,8	2,8	2,8
α. —	1,5	1,4	1,4	1,4	1,6
a. Elfenbeinkugel . .	4,4	2,8	2,4	2,7	2,6
α. — . .	1,5	1,4	1,5	1,4	1,4
a. Hartgummikugel .	6,0	4,0	2,5	2,6	2,5
α. — .	1,5	1,6	1,4	1,5	1,5

XVIII.



130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
5°
10°
20°
30°
40°
50°
60°
70°
Steinkugel C. vom Grössten D. in Zuckerlösg.
Steinkugel C. vom Grössten D. in Alkohol
Bleikugel A. vom Grössten D. in Zuckerlösg.
Bleikugel A. in Alkohol

Seinem väterlichen Oheim

Herrn Oberfinanzrath a. D. G. Zuschlag

in Liebe und Dankbarkeit

gewidmet.